



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS

AREA ACADEMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

“EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS ACEROS SAE 1045
Y 4140 TRATADOS TERMICAMENTE MEDIANTE LA
CARACTERIZACION MECANICA Y MICROESTRUCTURAL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

L I C E N C I A D O E N I N G E N I E R I A M I N E R O
M E T A L U R G I C A

P R E S E N T A :

ISAIAS MONZALVO BAZAN

DIRECTOR DE TESIS:

MTRA. MARIA FLORINA ILLESCAS LOPEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

ING. CARLOS DAVID GUZMAN LEON

2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 4 de agosto de 2025

Número de control: ICBI-D/1312/2025
 Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura En Ingeniería Minero Metalúrgica **Isaias Monsalvo Bazán**, quien presenta el trabajo de titulación "**Evaluación de la fiabilidad de los aceros SAE 1045 y 4140 tratados térmicamente mediante la caracterización mecánica y microestructural**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV, dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Ing. Carlos David Guzmán León

Secretario: Dr. Edgar Cardoso Legorreta

Vocal: M en C. María Florina Illescas López

Suplente: M. en C. Marcelino García Ramírez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director de ICBI



GVR/MCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 726 00 Ext. 40061
 direccion_icbi@uah.edu.mx, vergarar@uah.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uah.edu.mx

- *Fortis fortuna adiuvat.*

Contenido

<i>Índice de figuras</i>	6
Indice de tablas	11
<i>Índice de graficos</i>	11
Introducción.....	12
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Capítulo I: Generalidades.....	14
I.1. Clasificación de los aceros	14
I.1.1. Aceros de grado maquinaria.....	16
I.2. Clasificación de los elementos aleantes	18
I.2.1. Influencia de los elementos aleantes en las propiedades mecánicas ...	20
I.2.2. Influencia en los diagramas TTT	22
I.2.2.1 Cálculo de la temperatura de Ms.....	24
I.3. Fases presentes en las aleaciones ferrosas	25
I.4. Tratamientos termicos.....	28
I.4.1. Etapas de los tratamientos térmicos.....	28
A) Calentamiento a temperatura de austenización.....	28
B) Tiempo de mantenimiento en el horno.....	28
C) Enfriamiento.	28
I.4.2. Medios de enfriamiento	29
I.5. Clasificación de los tratamientos térmicos.....	30
Capítulo II: Desarrollo experimental.	32
II.1. Metodología de los tratamientos térmicos.	32
II.1.1. Ciclo del tratamiento térmico.....	33
II.3. Preparación metalográfica	36
II.3.1. Ataque químico	36
II.3.2. Medición de dureza y perfiles de profundidad.	36
II.3.2.1. Etapas de la prueba de dureza Rockwell B.....	37
II.3.3. Cuantificación de fases.....	37
II.4. Equipos.....	38
Capítulo III: Resultados y discusiones.....	40
III.1. Caracterización de las aleaciones.	40

III.1.1. Probeta base.....	40
➤ SAE 1045.....	40
➤ SAE 4140.....	41
III.1.2. Probetas con tratamiento térmico.....	45
III.1.2.1. Enfriamiento en Salmuera.....	45
➤ SAE 1045.....	45
.....	45
➤ SAE 4140.....	46
III.1.2.2 Enfriamiento en agua.....	50
➤ SAE 1045.....	50
➤ SAE 4140.....	51
III.1.2.3. Enfriamiento en Alcohol.....	56
➤ SAE 1045.....	56
➤ SAE 4140.....	57
III.1.2.4. Enfriamiento en Hielo.....	62
➤ SAE 1045.....	62
➤ SAE 4140.....	63
III.1.2.5. Enfriamiento en Aceite.....	67
➤ SAE 1045.....	67
➤ SAE 4140.....	68
III.1.2.6. Enfriamiento en aire ambiente.....	72
➤ SAE 1045.....	72
➤ SAE 4140.....	73
III.1.2.7. Enfriamiento en Arena.....	77
➤ SAE 1045.....	77
➤ SAE 4140.....	78
III.1.2.8. Enfriamiento en aire caliente.....	81
➤ SAE 1045.....	81
➤ SAE 4140.....	82
Conclusiones.....	90
Bibliografía.....	91

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de los aceros.....	15
Figura 2. Ejemplos de aplicación de los aceros SAE 1045 y 4140.....	16
Figura 3. Efecto del elemento gammágeno (Mn) sobre el diagrama hierro-carbono.....	17
Figura 4. Efecto del elemento alfégeno Cr sobre el diagrama hierro-carbono.....	18
Figura 5. Efecto sobre la temperatura eutectoide.....	18
Figura 6. Estructura del diagrama TTT de un acero eutectoide.....	21
Figura 7. Diagramas TTT de los aceros SAE a)1045 y b)4140.....	22
Figura 8. Morfologías de la ferrita primaria.....	26
Figura 9. Diagrama T vs t de los tratamientos térmicos.....	27
Figura 10. Clasificación del tratamiento continuo.....	29
Figura 11. Diagrama tiempo – temperatura para tratamientos térmicos: a) críticos b) Inter críticos c) subcríticos.....	30
Figura 12. Clasificación del tratamiento isotérmico.....	30
Figura 13. Diagrama temperatura – tiempo correspondiente al: a) martemperizado b) austemperizado c) recocido.....	31
Figura 14. Temperatura de austenización SAE 1045 y SAE 4140.....	32
Figura 15. Curvas de enfriamiento para el temple en los aceros: a) SAE 1045 b) SAE 4140.....	33
Figura 16. Curvas de enfriamiento para el aire ambiente y caliente en los aceros: a) SAE 1045 b) SAE 4140.....	34
Figura 17. comparativa de las técnicas de ataque químico.....	35
Figura 18. Patrón de indentaciones para la medición de durezas.....	35
Figura 19. Acero 1045 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Fase oscura perlita y fase clara ferrita.	40
Figura 20. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Se muestran los 3 tipos de perlita laminar y ferrita.....	40
Figura 21. Acero 1045 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Espacio interlaminar entre cementita y la matriz ferrítica de la perlita media.....	40
Figura 22. Acero 4140 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Región oscura de martensita revenida y clara de ferrita.....	41
Figura 23. Acero 4140 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Martensita revenida sobre una matriz ferrítica.....	41

<i>Figura 24. Acero 4140 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Región oscura de martensita revenida y clara de ferrita.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 25. Metalografías cuantitativas de los aceros base.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 26. Perfiles de profundidad de los aceros base en las tres regiones.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 27. Acero 1045 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 29. Acero 1045 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Medición de tamaño de la martensita y bainita.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 30. Acero 4140 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32. Acero 4140 a 100X/Nita3%/3s/Nikon. Puntos negros de sulfuro de hierro II.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 33. Acero 4140 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Medición de martensita y bainita....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 34. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en salmuera.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 35. Perfiles de profundidad del enfriamiento en salmuera.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 36. Acero 1045 a 1000X/Nita3%/3s/Nikon, Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 37. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Medición de bainita.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 38. Acero 1045 a 100X/Nita3%/3s/Keyence. Puntos negros de las colonias de perlita.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 39. Acero 1045 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Medición de martensita.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 40. Acero 4140 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Fracturas en la pieza.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41. Acero 4140 a 300X/Nita3%/3s/Keyence. Perfil de profundidad de la grieta.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 42. Acero 4140 a 1000X/Nita3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 43. Acero 4140 a 2500X/Nita3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 44. Acero 4140 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Medición de martensita y bainita.....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 45. Metalografías cuantitativas del temple en agua.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 46. Perfiles de profundidad del enfriamiento en agua.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 47. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita y ferrita primaria (alotriomorfa).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 48. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 49. Acero 4140 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Medición del espacio interlaminar de la ferrita y cementita.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 50. Acero 4140 a 30X. Grietas en la pieza después del temple.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 51. Acero 4140 a 300X/Nita3%/3s/Keyence Perfil de profundidad de la grieta en la superficie.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 52. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 53. Acero 4140 a 2500X/Nita3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 54. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de aguja de martensita y bainita inferior.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 55. Acero 4140 a 2500X/Nital/3%/3s/Keyence. Análisis puntual de composición química, a 300x.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 56. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en alcohol.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 57. Perfiles de profundidad del enfriamiento en alcohol.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 58. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita, ferrita, martensita y bainita.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 59. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Nikon. Ferrita Widmanstatten.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 60. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Mediciones de la estructura de Widmanstatten.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 61. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2.5s/Nikon. Bainita, perlita y ferrita priamaria.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 62. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2.5s/Keyence. colonia de perlita, bainita y ferrita.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 63. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2.5s/Keyence estructura Widmanstatten... ..</i>	<i>63</i>
<i>Figura 64. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en hielo.....</i>	<i>65</i>

<i>Figura 65. Perfiles de profundidad después del enfriamiento en hielo.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 66. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita, ferrita y ferrita Widmanstatten.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 67. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Ferrita Widmanstatten.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 68. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Ferrita Widmanstatten.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 69. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 70. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence, martensita en agujas y bainita inferior.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 71. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de bainita.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 72. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de martensita.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 73. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en aceite.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 74. Perfiles de profundidad del enfriamiento en aceite.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 75. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/2s/Nikon. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 76. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/2s/Keyence. Medición del espacio interlaminar de ferrita y cementita.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 77. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Medición del espacio interlaminar de ferrita y cementita.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 78. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2s/Nikon. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 79. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 80. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 81. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en aire ambiente.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 82. Perfiles de profundidad del normalizado.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 83. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 84. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 85. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de los espacios interlaminares de la cementita y ferrita.....</i>	<i>77</i>

<i>Figura 86. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Keyence. Perlita globular y ferrita en zonas claras.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 87. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Perlita globular y ferrita.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 88. Metalografías cuantitativas después del temple en arena.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 89. Perfiles de profundidad del temple en arena.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 90. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/2.5s/Nikon. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 91. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/2.5s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 92. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/2.5s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 93. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 94. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2s/Keyence. Perlita laminar, globular y de ferrita.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 95. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Medición de espacio interlaminar de la ferrita y cementita.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 96. Metalografías cuantitativas después del enfriamiento en aire caliente.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 97. Perfiles de profundidad después del recocido.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 98. Cuantificación de fases de los aceros SAE 1045 y 4140 a 2500x obtenidas con el microscopio Keyence VHX 7000.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 99. Dureza en los aceros SAE 1045 y 4140 después de ser tratados térmicamente.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 100. Profundidad de indentaciones en los aceros SAE 1045 y 4140 después de ser tratados térmicamente.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 101. Relación entre la dureza y profundidad promedio de indentación en los aceros SAE a) 1045 y b)4140 tratados térmicamente.....</i>	<i>89</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Composición química, propiedades mecánicas y aplicación de los aceros SAE 1045 y 4140.</i>	16
<i>Tabla 2. Elementos aleantes en los aceros.</i>	18
<i>Tabla 3. Diferentes tipos de carburos.</i>	20
<i>Tabla 4. Elementos aleantes y sus efectos en las propiedades mecánicas.</i>	20
<i>Tabla 5. Fases presentes en las aleaciones ferrosas.</i>	26
<i>Tabla 6. Valores de calor específico de los medios de enfriamiento.</i>	29
<i>Tabla 7. Medios de enfriamiento usados para los tratamientos térmicos.</i>	30
<i>Tabla 8. Características de los tratamientos térmicos continuos.</i>	31
<i>Tabla 9. Medios de enfriamiento para los tratamientos térmicos aplicados.</i>	33
<i>Tabla 10. Características de la martensita y bainita.</i>	37
<i>Tabla 11. Equipos utilizados para los tratamientos y la caracterización de las probetas.</i>	38
<i>Tabla 12. Composición química por análisis puntual.</i>	58
<i>Tabla 13. Comparativo de los valores de dureza de las probetas.</i>	87
<i>Tabla 14. Comparativo de los perfiles de profundidad promedio en los aceros.</i>	88

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Valores de dureza de las probetas base.</i>	42
<i>Gráfico 2. Valores de dureza después del enfriamiento en salmuera.</i>	47
<i>Gráfico 3. Valores de dureza después del enfriamiento en agua.</i>	53
<i>Gráfico 4. Valores de dureza después del temple en alcohol.</i>	59
<i>Gráfico 5. Valores de dureza después del temple en hielo.</i>	64
<i>Gráfico 6. Valores de dureza después del temple en aceite.</i>	69
<i>Gráfico 7. Valores de dureza después del normalizado.</i>	74
<i>Gráfico 8. Valores de dureza después del enfriamiento en arena.</i>	78
<i>Gráfico 9. Valores de dureza después del recocido.</i>	83

Introducción.

La maquinaria desempeña un papel esencial en el desarrollo de múltiples procesos, en donde cada equipo está conformado por diversos componentes, la mayoría de los cuales son fabricados con acero. Dentro de la clasificación de este, existe un grupo que se categoriza por su aplicación y no por la composición química, denominado “aceros grado maquinaria”, en este grupo se encuentran los aceros SAE 1045 (medio carbono) y 4140 (aleado al Cr - Mo), utilizados para la fabricación de repuestos de maquinaria. Las propiedades mecánicas se modifican mediante la aplicación de tratamientos térmicos.

Este estudio tiene como propósito evaluar la posibilidad de reemplazar el acero 4140 por el 1045 después de ser tratado térmicamente, al realizar el análisis microestructural, cuantificación de fases, medición de dureza y perfiles de profundidad.

El presente trabajo está constituido por 3 capítulos, describiendo en el capítulo I los conceptos de los aceros grado maquinaria, la influencia de los elementos aleantes en las propiedades mecánicas y los diagramas TTT, así como las clasificaciones de los tratamientos térmicos

El capítulo II describe la metodología que se siguió en el desarrollo experimental de los tratamientos térmicos, considerando la descripción de las aleaciones, reactivos y equipos que se emplearon para su realización.

En el capítulo III se presentan los resultados, las discusiones, y finalmente se emiten las conclusiones de este trabajo.

Objetivo general

Aplicación y evaluación de los tratamientos térmicos en los aceros SAE 1045 y 4140 a través de la caracterización, medición de dureza y cuantificación de fases, para determinar la sustitución del acero aleado por el acero al carbono.

Objetivos específicos

- 1.) Realizar los tratamientos térmicos de: recocido, normalizado y temple en diversos medios (agua, salmuera, aceite, hielo y arena), empleando diferentes probetas de las dos aleaciones para lograr diferentes transformaciones.
- 2.) Caracterizar metalográficamente (cuantitativa y cualitativa) las probetas base y tratadas, mediante microscopía óptica y digital.
- 3.) Determinar la dureza Rockwell B a través de un macro durómetro para hacer una evaluación comparativa de dicha propiedad y determinar la aleación y el medio de enfriamiento más adecuado para las aplicaciones requeridas.

Capítulo I: Generalidades

En este primer capítulo se aborda la clasificación de los aceros, haciendo énfasis en los de grado maquinaria. Se analiza la influencia de los elementos aleantes en las aleaciones ferrosas. Asimismo, se describen las fases presentes en dichas aleaciones, dando mayor atención en la formación y características de la ferrita primaria.

Se habla además de los tratamientos térmicos abarcando sus etapas, clasificación y medios de enfriamiento.

I.1. Clasificación de los aceros

Las aleaciones Fe – C también contienen Si, P, S y Mn, y se denominan aceros, cuando el porcentaje de C no rebasa el 2.11, si los contenidos de Si y Mn son menores al 0.5% y el P y S son inferiores al 0.05%, sin elementos aleantes, se llaman aceros al carbono. Cuando a los aceros se les añaden elementos aleantes, se ven alteradas las propiedades químicas y mecánicas, generando nuevas aleaciones nombradas aceros aleados. La clasificación de los aceros se realiza de acuerdo a diferentes aspectos, como el proceso de fabricación, las propiedades mecánicas utilizadas por la ASTM (Asociation of Standars of Test of Materials), la composición química de acuerdo a la AISI (American Institute of Steel and Iron) y la SAE (Society of Automotive Engineers), entre otros. En la figura 1, se presenta el esquema que muestra la agrupación de los aceros.

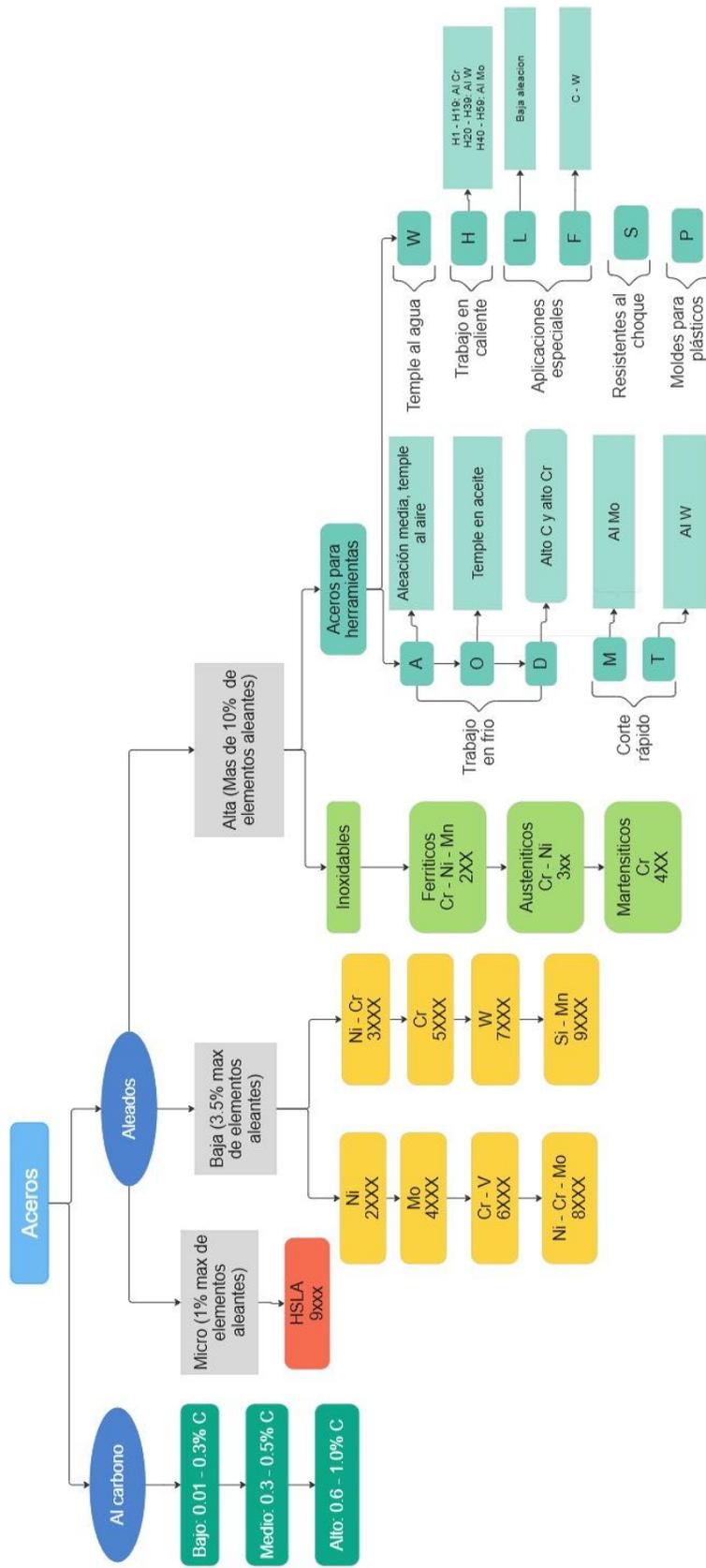


Figura 1. Clasificación de los aceros

I.1.1. Aceros de grado maquinaria

Debido a la amplia gama de aleaciones ferrosas para la industria, los aceros grado maquinaria son clasificados por su aplicación (reparación y fabricación de componentes de maquinaria), y no por su composición química. Estas aleaciones son de medio carbono y de micro y baja aleación.

En la figura 2 se muestran algunos ejemplos de componentes de las diversas industrias; conforme a las propiedades mecánicas que se presentan en la tabla 1, los aceros SAE 1045 y 4140 resultan adecuados para la producción de dichas piezas.

*Tabla 1. Composición química, propiedades mecánicas y aplicación de los aceros SAE 1045 y 4140.¹ *” Frio” y “Caliente” hacen referencia al trabajo en frio y en caliente.*

Acero	Composición química (%)	Propiedades mecánicas									
		LE (MPa)		LR (MPa)		%E		%RA		Dureza (HR _b)	
SAE 1045	C: 0.43 – 0.5 Si: ≤ 0.4 Mn: 0.6 – 0.9 P: ≤ 0.035 S: ≤ 0.035	Frio	Caliente	Frio	Caliente	Frio	Caliente	Frio	Caliente	Frio	Caliente
				529.6	310.30	627.6	565.45	12	16	35	40
SAE 4140	C: 0.43 – 0.5 Si: ≤ 0.4 Mn: 0.6 – 0.9 P: ≤ 0.035 S: ≤ 0.035 Cr: 0.8 –1.1 Mo:0.15-0.25	LE (MPa)		LR (MPa)		%E		%RA		Dureza (HR _b)	
		655.13		1 019.89		17.7%		47%		90	

SAE 1045



Perno para cucharón de excavadora (sector de construcción)

SAE 4140



Eje para árbol de reductor (sector metal mecánico)



Engrane de segadora (sector agrícola)



Brida para tubería (sector hidráulico)



Eje de hélice (Sector naval)



Piñón helicoidal bomba de lodo (sector petrolero)



Eje de rodillo cinta transportadora (sector minero)



Eje de bomba para lodo o pulpa (sector minero)

Figura 2 . Ejemplos de aplicación de los aceros SAE 1045 y 4140.^{2,3,i1,i2,i3,i4,i5,i6,i7,i8}

I.2. Clasificación de los elementos aleantes

Durante el proceso de producción de las aleaciones ferrosas se adicionan elementos metálicos y/o no metálicos; estos, debido a sus propiedades fisicoquímicas tienen diferente afinidad con el Fe, por esto, se clasifican en alfégenos, gammagenos y carburigenos, como se observa en la tabla 2. Así mismo cuando se disuelven los elementos aleantes en el Fe, se modifica el tamaño de la región de las fases presentes en el diagrama Fe – C, como se observa en las figuras 3 y 4; otro cambio que se distingue es en la temperatura eutectoide, como indica la figura 5.

Tabla 2. Elementos aleantes en los aceros.⁵

Aleante	Elementos
Alfégenos	Cr, W, Mo, Si, Al, P, Sn
Gammagenos	C, Mn, Ni, Co, N, Zn, Cu
Carburigenos	Fe, Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Hf, Zr, Ta y Ti
Grafitizantes	Si, Ni, Cu, Al

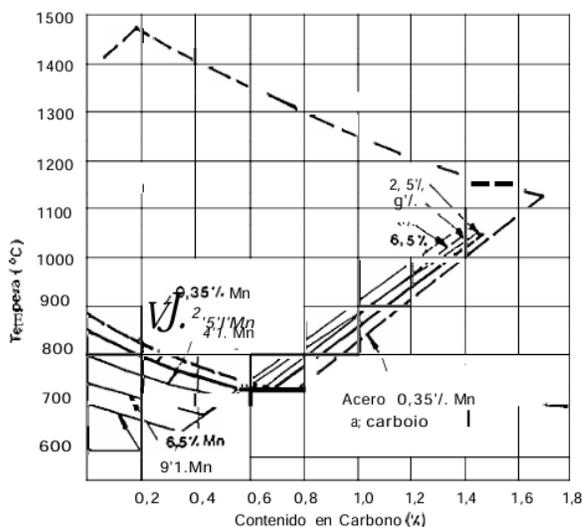


Figura 3. Efecto del elemento gammágeno (Mn) sobre el diagrama hierro-carbono.⁴

La influencia de los elementos gammágenos como el Mn en el diagrama Fe - C, aumentan el área donde la austenita es más estable. En la figura 3 se distingue un incremento del tamaño de la región en proporción directa del porcentaje de Mn añadido.

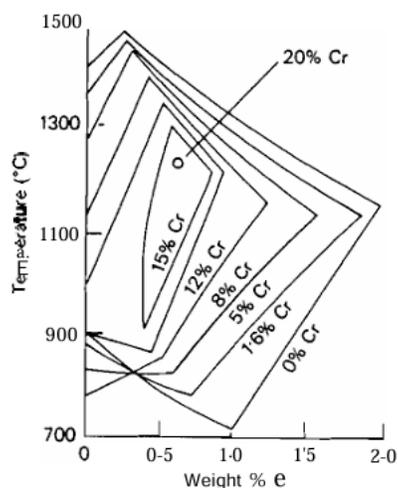


Figura 4. Efecto del elemento alfégeno Cr sobre el diagrama hierro-carbono.⁵

Los elementos alfégenos como el Cr presentan un efecto contrario a los gammágenos, al aumentar la región estable para la ferrita. Se aprecia en la figura 4 que al adicionar Cr en porcentajes promedio del 1.0 % se obtiene un mayor tamaño de la región.

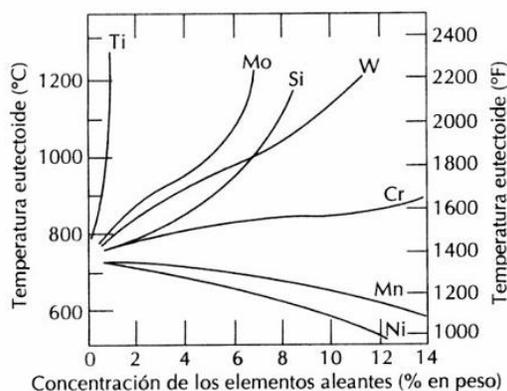
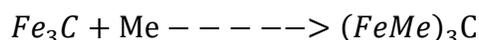


Figura 5 Efecto sobre la temperatura eutéctica.⁵

En la figura 5 se observa que los elementos alfégenos (Mo, Si, Cr) incrementan la temperatura eutéctica, por ejemplo, el Cr que al añadirse en porcentajes cercanos al 1% aumenta la temperatura eutéctica de 760°C. Por el contrario, los gammágenos (Mn) la disminuyen.

Los elementos grafitizantes Ni, Si, Cu y Al son aquellos que favorecen la descomposición de la cementita y promueven la formación de grafito en los hierros; en cambio los elementos carburigenos, adoptan la misma posición que los átomos de Fe, como se observa en la siguiente reacción:



Donde Me representa al elemento carburigeno.⁵ Los carburos que se forman se aprecian en la tabla 3.

Tabla 3. Diferentes tipos de carburos.⁵

I	Me_3C	Carburos tipo cementita
II	$Me_{23}C_6$ y Me_7C_3	Carburos tipo carburo simple de cromo
III	Me_6C y Me_4C	Carburos tipo carburos dobles de W y Mo
IV	MeC	Carburos tipo carburo de titanio

I.2.1. Influencia de los elementos aleantes en las propiedades mecánicas

Las aplicaciones de las aleaciones ferrosas dependen de las diversas propiedades mecánicas resultado de la composición química, en la tabla 4 se muestra la influencia de los elementos aleantes; por ejemplo, el límite elástico y la resistencia a la tracción, indican la capacidad de las aleaciones para soportar esfuerzos antes de deformarse o fracturarse respectivamente, otras propiedades, como el porcentaje de elongación utiliza la estricción, la cual es la reducción de la sección transversal de la probeta antes de fracturarse, así mismo las energías que se absorben durante esta prueba son la resiliencia (rango elástico) y tenacidad (rango plástico).

Otros aspectos metalúrgicos que se presentan en las aleaciones es la capacidad para la formación de martensita, denominada templabilidad, reducción del tamaño de grano, resistencia a la corrosión y maquinabilidad.

Tabla 4. Elementos aleantes y sus efectos en las propiedades mecánicas.

ELEMENTO ALEANTE	FORMA DE ADICIÓN	OBSERVACIONES
ALUMINIO	Metálico	De 0.01 - 0.09% afina el grano, aumenta la resistencia a la corrosión al aire y al agua de mar, reduce el efecto del nitrógeno durante la nitruración. Se utiliza en aceros para imanes (14%), y como recubrimiento (Aluminizado)
ANTIMONIO	Chatarra	Con porcentajes mayores de 0.5% incrementa la fragilidad
ARSENICO	Chatarra	Con un porcentaje máximo del 1 % aumenta la resistencia a la tracción y el límite elástico, pero disminuye la estricción y la resiliencia, con porcentajes mayores del 0.8% aumenta el envejecimiento del acero y a partir de 0.25 % disminuye su soldabilidad.

AZUFRE	Materia prima	De 0.13 - 0,30% facilita la mecanización (aceros resulturados 11XX, aceros resulturados y refosforados 12XX), con porcentajes mayores de 0.030 en el resto de los aceros provoca fragilidad en caliente.
BORO	Ferroaleación	Se utiliza de 0.005 a 0.008 % para incrementar la templabilidad
CARBONO	Chatarra Gráfico	Incrementa la dureza, resistencia a la tracción, tenacidad, templabilidad, resistencia al desgaste, también se utiliza para tratamientos térmicos superficiales (Cementación)
CERIO	Metálico fundido	Reduce tamaño de grano formando inclusiones con azufre
CIRCONIO	Metálico	Actúa como desulfurante, desfosforante y desnitrógeno; mejora la maleabilidad reduce la fragilidad en frío.
COBALTO	Chatarra	Reduce la templabilidad y la tenacidad, aumenta la temperatura Ms y la dureza, se utiliza para aceros rápidos "HSS" (2-25%), y para aceros para imanes (35%). Actualmente no se utiliza por su alta radiactividad.
COBRE	Metálico Chatarra	Con porcentajes de 0.10 a 0.60 incrementa la templabilidad, límite elástico, resistencia a la tracción y resistencia a la corrosión.
CROMO	Chatarra Ferroaleación	Incrementa la dureza, resistencia a la tracción, límite elástico, tenacidad, resistencia al desgaste y reduce la temperatura Ms. Se adiciona 1.4 % para aceros de baja aleación, de 0.8 a 12% para aceros grado herramienta y de 12 a 23% en aceros inoxidable, también se usa como recubrimiento (Cromizado)
ESTAÑO	Chatarra	Incrementa la fragilidad en caliente, actúa en forma parecida al fósforo, pero es cuatro veces más intenso.
FOSFORO	Materia prima	De 0.06- 0.12% facilita la mecanización (aceros resulturados y refosforados 12XX), con porcentajes mayores de en el resto de los aceros provoca fragilidad en frío, se utiliza como recubrimiento (fosfatación).
HIDROGENO	Humedad	En cantidades mayores del 0.0003% provoca sopladuras y grietas durante la conformación plástica.
MANGANESO	Ferroaleación	De 0.8 a 1.6% aumenta templabilidad, resistencia a la tracción y límite elástico además reduce la temperatura Ms; para aceros al manganeso (13XX) se utiliza de 1.4 a 1.9%, en los aceros resistentes al desgaste (Hadfield) se agrega el 12%.
MOLIBDENO	Ferroaleación	Aumenta templabilidad, resistencia a la tracción, límite elástico y dureza; reduce la fragilidad de revenido y favorece la cementación. Se utiliza de 0.1 a 0.25% en aceros de baja aleación (40XX), y en los aceros grado herramienta "M" y "H" con porcentajes de 1 a 5.
NIOBIO	Ferroaleación	Con cantidades del 2% aumenta la resistencia en caliente al desgaste.
NIQUEL	Metálico Chatarra	Aumenta la tenacidad, resistencia a la tracción, límite elástico y resistencia a la fatiga. Se utiliza de 0.5 a 5% para aceros de baja aleación de la serie 2XXX, 3XXX y 8XXX, en aceros inoxidable con 7 a 12%. Se usa como recubrimiento (Niquelado),
NITROGENO	Ambiente Gas	En muy pocas cantidades incrementa la dureza y la resistencia a la tracción, se utiliza para tratamientos térmicos superficiales (nitruración).
OXIGENO	Ambiente	Genera sopladuras
PLOMO	Metálico Chatarra	Se emplea en proporciones de 0.10 a 0.15% en la fabricación de aceros de fácil maquinado (XXLXX), con porcentajes mayores al 0.20% incrementa la fragilidad.
SELENIO	Metálico	Con porcentajes de 0.2% incrementa la maquinabilidad.

SILICIO	Ferroaleación	Con cantidades de 0.4% aumenta la templabilidad, dureza, limite elástico, tenacidad y resistencia al desgaste. Se utiliza de 1.5 a 2% en aceros de baja aleación de la serie 92XX
TELURIO	Metálico	Se añade de 0.03 a 0.05% para mejorar su maquinabilidad.
TITANIO	Ferroaleación	Si el porcentaje es mayor al 4% reduce la templabilidad, y afina el grano. Es el mejor desnitrurante, desulfurante y desoxidante.
URANIO	Metálico (fundido)	En porcentajes de 0.2% incrementa la dureza por la formación de carburos. Su uso no es extenso porque es radioactivo y costoso.
VANADIO	Ferroaleación	Incrementa la dureza, templabilidad y tenacidad; además afina el tamaño de grano. Se utiliza en porcentajes de 0.5 a 2% en aceros grado herramienta "M".
WOLFRAMIO	Ferroaleación	Aumenta la templabilidad, dureza y resistencia al desgaste, de 0.5 a 18% se agrega en aceros grado herramienta de alta velocidad "M" y "T".

I.2.2. Influencia en los diagramas TTT

El diagrama TTT (Tiempo – Temperatura – Transformación) es una representación gráfica de las transformaciones de fase con respecto al tiempo y temperatura, en la figura 6 se muestra el diagrama donde se indican las curvas de inicio y fin de transformación de la austenita a las fases: perlita, bainita y martensita en determinadas regiones.

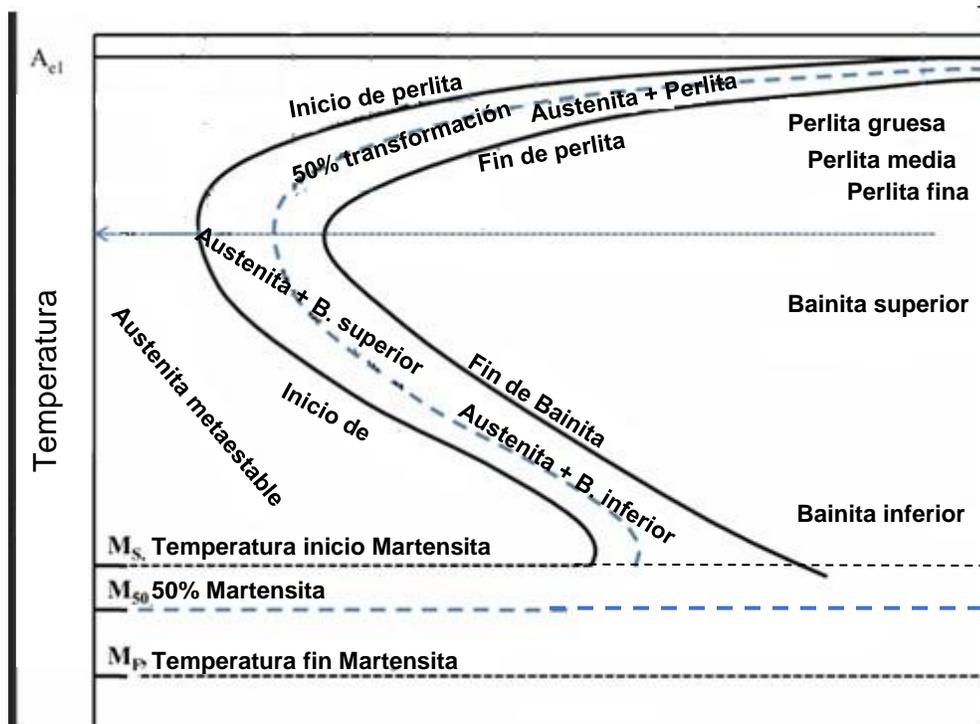


Figura 6. Estructura del diagrama TTT de un acero eutectoide.¹⁹

En los aceros hipo eutectoides como en el inciso “a” de la figura 7, se observa que las curvas de transformación están desplazadas hacia la izquierda, mientras que en los eutectoides (figura 6) se desplazan hacia la derecha, así mismo, la influencia de los elementos aleantes alfégenos provoca el desplazamiento de las curvas de transformación hacia la derecha; sumado a esto se presenta la formación de “narices” por la separación de las regiones de las fases perlítica y bainítica, algunos de estos desplazan a tiempos tan prolongados que no permiten la formación de cierta fase (esto se atribuye al porcentaje de Cr en la aleación cuando se comporta como alfégeno al estar presente en cantidades iguales o menores al 5%), asimismo, estos provocan la modificación de las temperaturas Ac_3 , Ac_1 y de M_s .

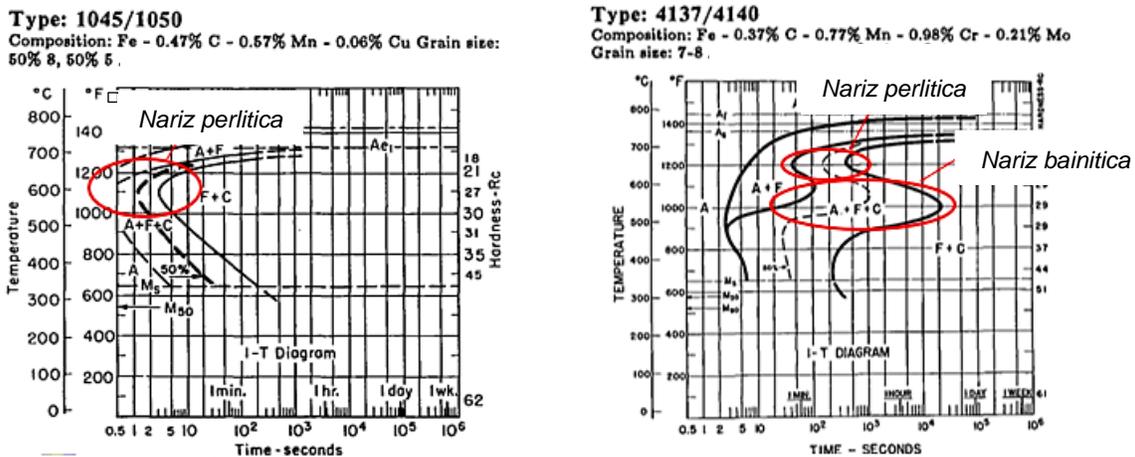


Figura 7. Diagramas TTT de los aceros SAE a)1045 y b)4140. ¹⁰

En la figura 7 se muestran los diagramas TTT de los aceros SAE 1045 y 4140 donde se observa el cambio en la forma de las curvas, en el acero 1045 se asemejan a una forma en “C” mientras que en el 4140 la forma es de “ε”, en este aparecen dos “narices”, una en la región perlítica y otra en la región bainítica. Los porcentajes de Cr y Mo en el SAE 4140 influyen más en desplazamiento de las curvas de transformación hacia la derecha, en comparación con el 0.05% de C de diferencia el SAE 1045.

I.2.2.1 Cálculo de la temperatura de Ms

Los elementos aleantes modifican la temperatura de inicio de transformación martensítica (Ms o martensita start) en la aleación, existen diferentes autores que han propuesto ecuaciones matemáticas para determinarla a partir de la composición química, por lo que se proponen 3 autores ⁶, de los cuales se compararan los valores de Ms en cada aleación, así mismo se comprobó el resultado en los diagramas TTT.

a) Payson and Savarage

$$M_S = 930 - 570 C - 60 Mn - 50 Cr - 30 Ni - 20 Si - 20 Mo - 20 W$$

- Acero 1045

$$M_S = 930 - (570 * 0.465) - (60 * 0.75) - (20 * 0.4) = 611.95 F^\circ = 322.19^\circ C$$

- Acero 4140

$$M_S = 930 - (570 * 0.405) - (60 * 0.875) - (50 * 0.95) - (20 * 0.4) - (20 * 0.20) = 587.15 F^\circ = 308.41^\circ C$$

b) Carapella

$$M_S = 925 * (1-0.620 C) * (1-0.092 Mn) * (1-0.033 Si) * (1-0.045 Ni) * (1-0.070 Cr) * (1-0.029 Mo) * (1-0.018 W) * (1+0.120 Co)$$

- Acero 1045

$$M_S = 925 * (1-(0.620 * 0.465)) * (1-0.092 * 0.75) * (1-(0.033 * 0.4)) = 563.076 F^\circ = 295.042^\circ C$$

- Acero 4140

$$M_S = 925(1-(0.620 * 0.405))(1-(0.092 * 0.875))(1-(0.033 * 0.4))(1-(0.070 * 0.95))(1-(0.029 * 0.20)) = 583.357 F^\circ = 306.309^\circ C$$

c) Rowland and Lyle

$$M_S = 930 - 600 C - 60 Mn - 50 Cr - 30 Ni - 20 Si - 20 Mo - 20 W$$

- Acero 1045

$$M_S = 930 - (600 * 0.465) - (60 * 0.75) - (20 * 0.4) = 590.5 F^\circ = 310.27^\circ C$$

- Acero 4140

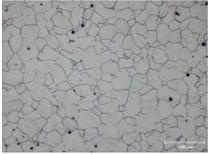
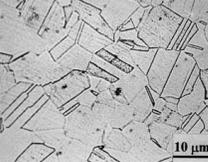
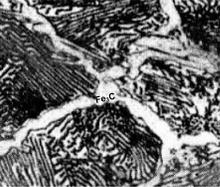
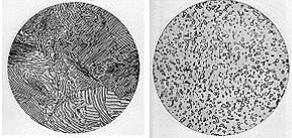
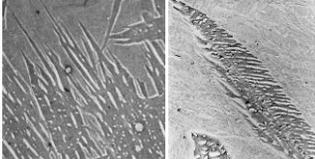
$$M_S = 930 - (600 * 0.405) - (60 * 0.875) - (50 * 0.95) - (20 * 0.4) - (20 * 0.20) = 575 F^\circ = 301^\circ C$$

Comparando el valor de M_s de los diagramas TTT y los resultados de las ecuaciones, se observa que las fórmulas de los autores Payson and Savarage y Rowland and Lyle muestran valores similares para el acero 1045, con una variación entre 18 y 30°C respectivamente; en cambio para el acero 4140 se muestra una diferencia mayor a 30 °C con los 3 autores.

I.3. Fases presentes en las aleaciones ferrosas

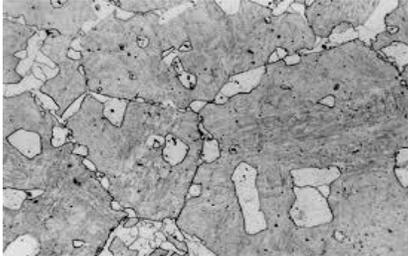
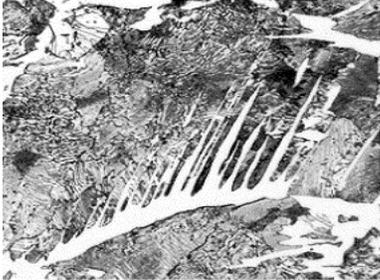
En los tratamientos térmicos se presenta la transformación de fases a partir de la austenita, en la tabla 5 se muestran las fases y sus características, las cuales determinan las propiedades mecánicas obtenidas en las aleaciones ferrosas.

Tabla 5. Fases presentes en las aleaciones ferrosas.^{7,8,9,10,11,12,13} Nota: Durezas en HRc*

Fase	Símbolo	Sustancia	Red de Bravais	Composición química	Temperatura	Clasificación	Micro estructura	Dureza HR _c
Ferrita	α	Solución sólida intersticial	BCC	0.0008% – 0.0218% C	25° - 727°C	- Primaria - Eutectoide		100
Austenita	γ	Solución sólida intersticial	FCC	0.000001 % C - 2.11% C	727°C – 1130°C	-		114
Cementita	Fe ₃ C	Compuesto	Ortorrómbica	0.000001 %C - 6.69% C	25° – 727°C	- Primaria - Secundaria - Terciaria		68*
Perlita	P	Mezcla de fases (α + Fe ₃ C)	-	0.77%C	25°– 727°C	- Laminar • Gruesa • Media • Fina - Globular		Gruesa: 96 Media: 101 Fina: 114 Globular: -10
Martensita	M	Solución sólida intersticial	TBC	0.0008%C – 1.4%C	220°C – 320°C	- Láminas - Agujas		Láminas: 45* Agujas: 50*
Bainita	B	Mezcla de fases (α + Fe ₃ C)	-	0.32%C – 0.4%C	330°C – 550°C	- Superior - Inferior		Promedio: 50*

Como se menciona en la tabla 5, la ferrita es una solución sólida intersticial con estructura BCC, se presenta en dos tipos: primaria y eutectoide, se forman durante el enfriamiento, cabe resaltar que la ferrita primaria presenta 3 morfologías: alotriomorfica, idiomorfica y Widmanstätten; en la figura 8 se describen las condiciones de transformación; de las tres morfologías la de Widmanstätten proporciona fragilidad en las piezas.

Figura 8. Morfologías de la ferrita primaria.^{14,15}

<i>Nombre</i>	<i>Mecanismo de formación</i>	<i>Microestructura</i>
<i>Alotriomorfica</i>	<i>Cristales sin forma definida, crecimiento alrededor del límite de grano por las altas temperaturas.</i>	
<i>Idiomorfica</i>	<i>Similar a la alotriomorfica, se encuentra como incrustaciones equiaxiales en los granos. Formada a menor temperatura.</i>	
<i>Widmanstätten</i>	<i>Cristales en agujas formados en los límites o el núcleo de los granos por un lento enfriamiento.</i>	

I.4. Tratamientos térmicos.

Son procesos controlados de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento, su objetivo es modificar las propiedades mecánicas de las aleaciones, estos pueden ser aplicados después de procesos de conformación plástica, soldadura, maquinado, metalurgia de polvos, y/o fundición.

I.4.1. Etapas de los tratamientos térmicos

En la figura 9 se indican las etapas de los tratamientos térmicos en un diagrama T vs t.

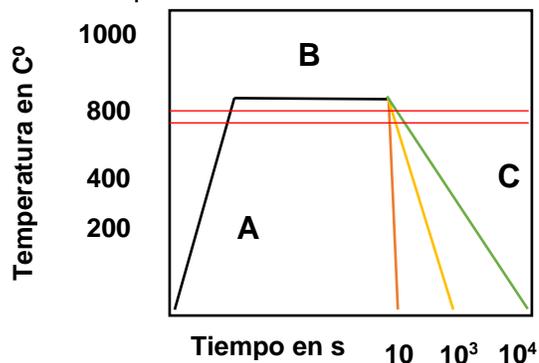


Figura 9. Diagrama T vs t de los tratamientos térmicos.

A) Calentamiento a temperatura de austenización.

Para determinar la temperatura de austenización se utiliza el diagrama Fe – Fe₃C; en los aceros hipo eutectoides se calcula la sumatoria de: A_{c3} , A_{e3} , $A_f + 50$ a 70°C y en los hiper eutectoides: $A_{c1} + 50$ a 70°C .

B) Tiempo de mantenimiento en el horno.

Es el periodo en donde las piezas son sometidas a un mantenimiento de la temperatura de austenización en el horno, se recomiendan 30 minutos de mantenimiento en el horno por cada pulgada de espesor.

C) Enfriamiento.

Cuando se genera una diferencia en la temperatura entre la superficie y el centro de la pieza se denomina gradiente térmico, este se presenta desde la temperatura de

austenización a la ambiente, a partir de los medios de enfriamiento, lo cual provoca la transformación de la austenita en las diferentes fases que se mencionan en la figura 6.

I.4.2. Medios de enfriamiento

Son las sustancias que facilitan la transferencia de calor, a esta capacidad se le denomina “severidad de temple “, es decir, se disminuye la temperatura de las piezas austenizadas hasta la ambiente, estos medios presentan diferentes propiedades físicoquímicas, por ejemplo:

- **Temperatura inicial:** si es mayor a la temperatura ambiente, dificulta el proceso de enfriamiento.
- **Temperatura de ebullición:** si es menor a 300°C, el enfriamiento se ve comprometido al desprenderse gases que recubren la pieza.
- **Calor específico:** A un mayor valor existe mayor velocidad de enfriamiento, en la tabla 6 se muestran los valores para algunos medios de enfriamiento. ¹⁶

Tabla 6. Valores de calor específico de los medios de enfriamiento.^{17,18,19,20,21,22}

<i>Medio de enfriamiento</i>	<i>Calor específico KJ/Kg°C</i>
<i>Salmuera</i>	<i>3.91</i>
<i>Agua</i>	<i>4.18</i>
<i>Alcohol</i>	<i>2.44</i>
<i>Aceite</i>	<i>2.0</i>
<i>Hielo</i>	<i>2.05</i>
<i>Arena</i>	<i>0.80</i>
<i>Aire</i>	<i>1.005</i>

Cuando la rapidez de enfriamiento es superior a la crítica se generan tensiones en la pieza, siendo de compresión en la periferia y de tracción en el centro; estas se conocen como “tensiones estructurales”, que generan en las piezas tensiones residuales; en la tabla 7 se describen algunas características de los medios de enfriamiento.

Tabla 7. Medios de enfriamiento usados para los tratamientos térmicos.

Salmuera	La adición de NaCl al agua incrementa la severidad de temple, debido a que los cristales de sal estallan rompiendo la barrera de vapor que recubre la pieza.
Alcohol	Su efectividad varía dependiendo del tipo de aleación, se aplica en piezas pequeñas.
Hielo	La efectividad puede variar, tiende a ser un enfriamiento irregular.
Agua	No debe sufrir calentamiento para evitar el prolongamiento del enfriamiento, generalmente es uno de los medios con mayor eficiencia.
Aceite	Los aceites minerales tienen mayor eficiencia, esta se ve incrementada con la temperatura (entre 30 y 40 °C) ya que la viscosidad disminuye, la volatilidad debe ser baja y la temperatura de combustión lo más alta posible.
Arena	El enfriamiento es gradual y homogéneo, requiere de mayor tiempo, la probabilidad de una deformación o agrietamiento es menor.
Aire ambiente	Ofrece una baja severidad de temple, lo que provoca pocas tensiones internas que puedan poner en riesgo la pieza.
Aire caliente	Enfriamiento controlado y homogéneo, requiere de mayor tiempo para alcanzar la temperatura ambiente.

I.5. Clasificación de los tratamientos térmicos.

De acuerdo al propósito de los tratamientos térmicos, y al control de los parámetros de temperatura, tiempo y medio de enfriamiento, se clasifican en **continuos** e **isotérmicos**.

I.5.1. Continuos:

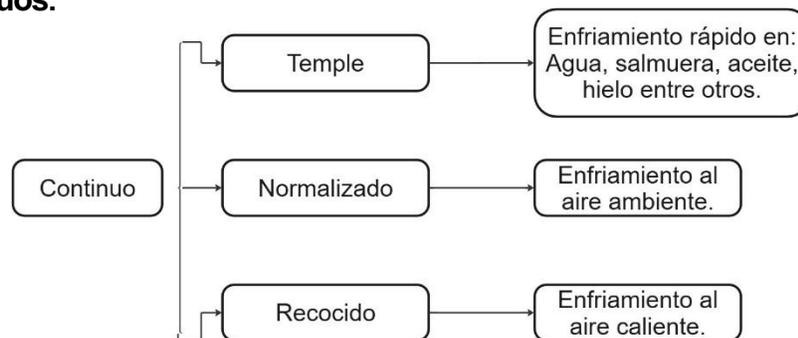


Figura 10. Clasificación del tratamiento continuo.

Son los tratamientos que se realizan a las aleaciones con una velocidad de enfriamiento constante (la cual se obtiene por los medios de enfriamiento), después que fueron calentadas y mantenidas a la temperatura de austenización.

Tabla 8. Características de los tratamientos térmicos continuos

Tratamiento	Objetivo	Dureza promedio (HR _c)	Medio de enfriamiento	Velocidad promedio de transformación (°C/s)
Recocido	Formación de perlita.	22	Aire caliente	0.359
Normalizado	Formación de perlita - bainita	38	Aire ambiente	0.819
Temple	Formación de martensita o bainita.	60	Agua o aceite	40.46

Otra clasificación que puede darse es en función de la transformación, en el calentamiento crítico se obtiene austenita, en el intercrítico una mezcla de fase primaria y austenita, y en el subcrítico no hay transformación de fases.

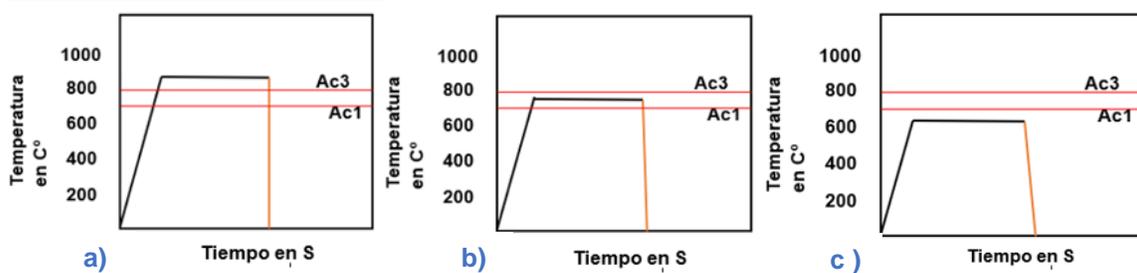


Figura 11. Diagrama tiempo – temperatura para tratamientos térmicos:
a) críticos b) Inter críticos c) subcríticos

I.5.2. Isotérmicos:

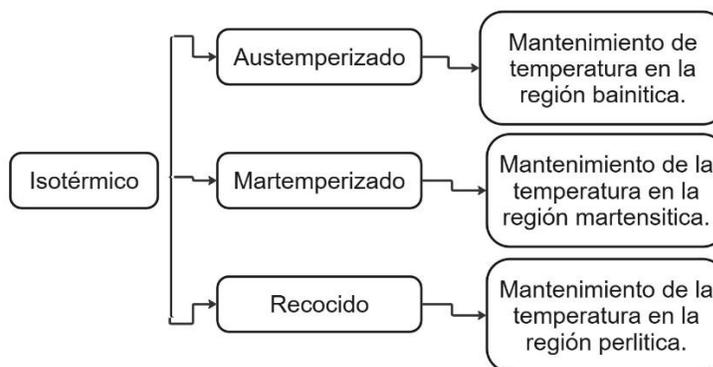


Figura 12. Clasificación del tratamiento isotérmico.

Son los tratamientos que se realizan a las aleaciones para proporcionar el tiempo de mantenimiento a determinada temperatura en un baño de sales, ya sea en las regiones de perlita, bainita o martensita, para después ser enfriado al aire ambiente.

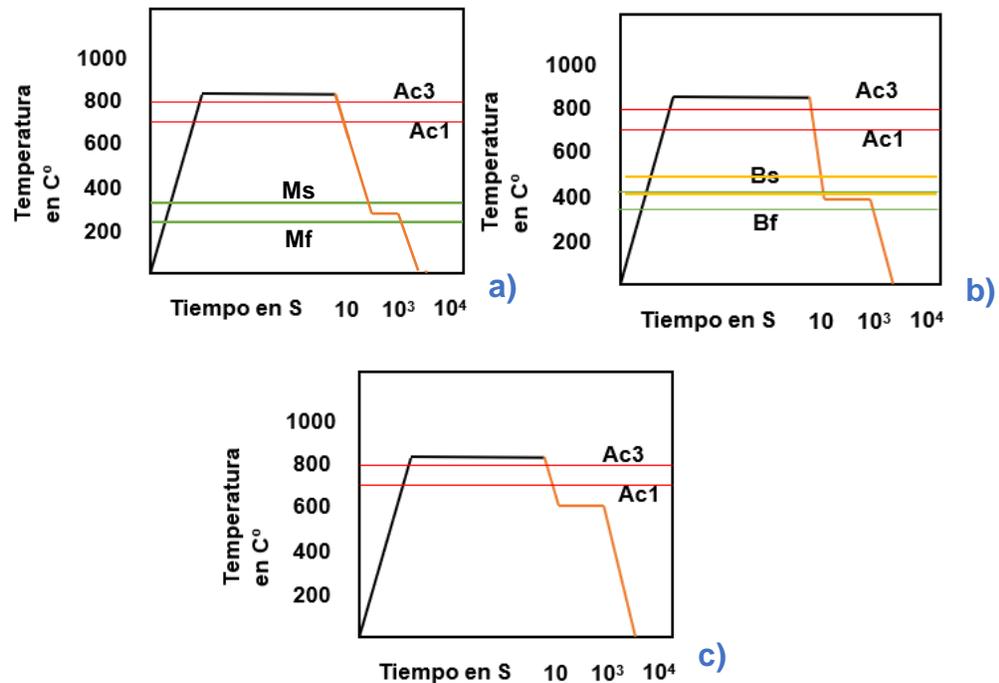


Figura 13. Diagrama temperatura – tiempo correspondiente al:
a) martemperizado b) austemperizado c) recocido.

Capítulo II: Desarrollo experimental.

En este capítulo se describen los parámetros y equipos para los tratamientos térmicos continuos a los que serán sometidos los aceros, además de la metodología para su caracterización.

II.1. Metodología de los tratamientos térmicos.

Con el propósito de sustituir el acero aleado por el acero al carbono, se utilizaron dos barras redondas de los aceros SAE 1045 y 4140 (se comercializa templado y revenido) con diámetro de 2.54 cm para obtener 9 probetas de cada uno y aplicar tratamientos térmicos de recocido, normalizado y temple en diferentes medios de enfriamiento a 8 de ellas, los cuales se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Medios de enfriamiento para los tratamientos térmicos aplicados.

Medio	Tratamiento	Muestras	
		1045	4140
Salmuera	Temple	1	1
Alcohol		1	1
Hielo		1	1
Agua		1	1
Aceite		1	1
Arena		1	1
Aire ambiente	Normalizado	1	1
Aire caliente	Recocido	1	1

II.1.1. Ciclo del tratamiento térmico.

De acuerdo a la figura 9, las piezas deben ser llevadas a la temperatura de austenización, la cual se determina a partir de la fórmula de $A_{c3} + 70^{\circ}\text{C}$, en cada acero:

$$1045: 770^{\circ}\text{C} + 70^{\circ}\text{C} = \underline{840^{\circ}\text{C}}; 4140: 790^{\circ}\text{C} + 70^{\circ}\text{C} = \underline{860^{\circ}\text{C}}.$$

La temperatura promedio para los dos aceros es de 850°C , como se observa en la figura

14.

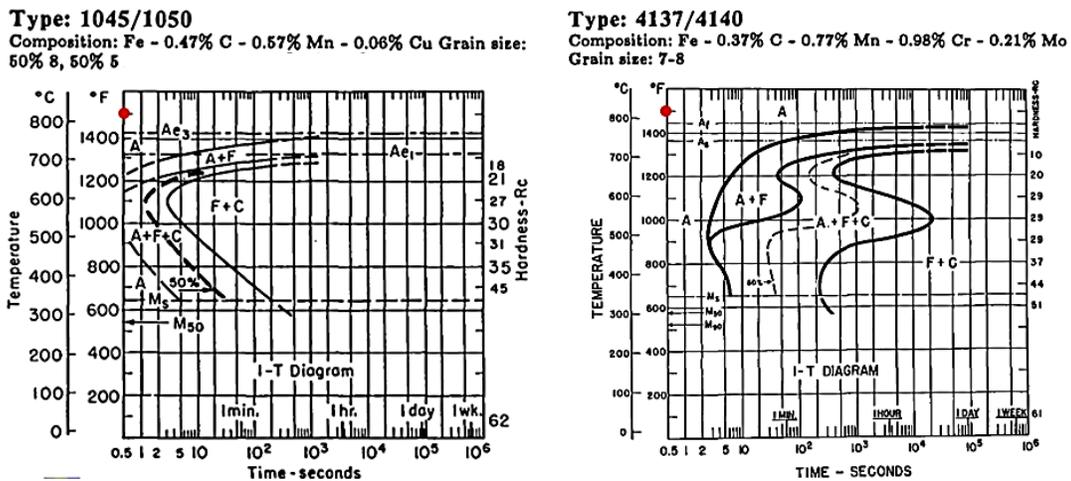


Figura 14. Temperatura de austenización SAE 1045 y SAE 4140.¹⁰

Las piezas se mantuvieron durante 30 minutos para la austenización, después se emplearon diferentes medios de enfriamiento, para el normalizado aire ambiente y para el recocido aire caliente, en el temple se utilizaron los diferentes medios de enfriamiento.

En la figura 15 se muestran las curvas que representan la velocidad de enfriamiento de los medios del temple en los dos aceros, y en la figura 16 las del enfriamiento en aire ambiente y aire caliente.

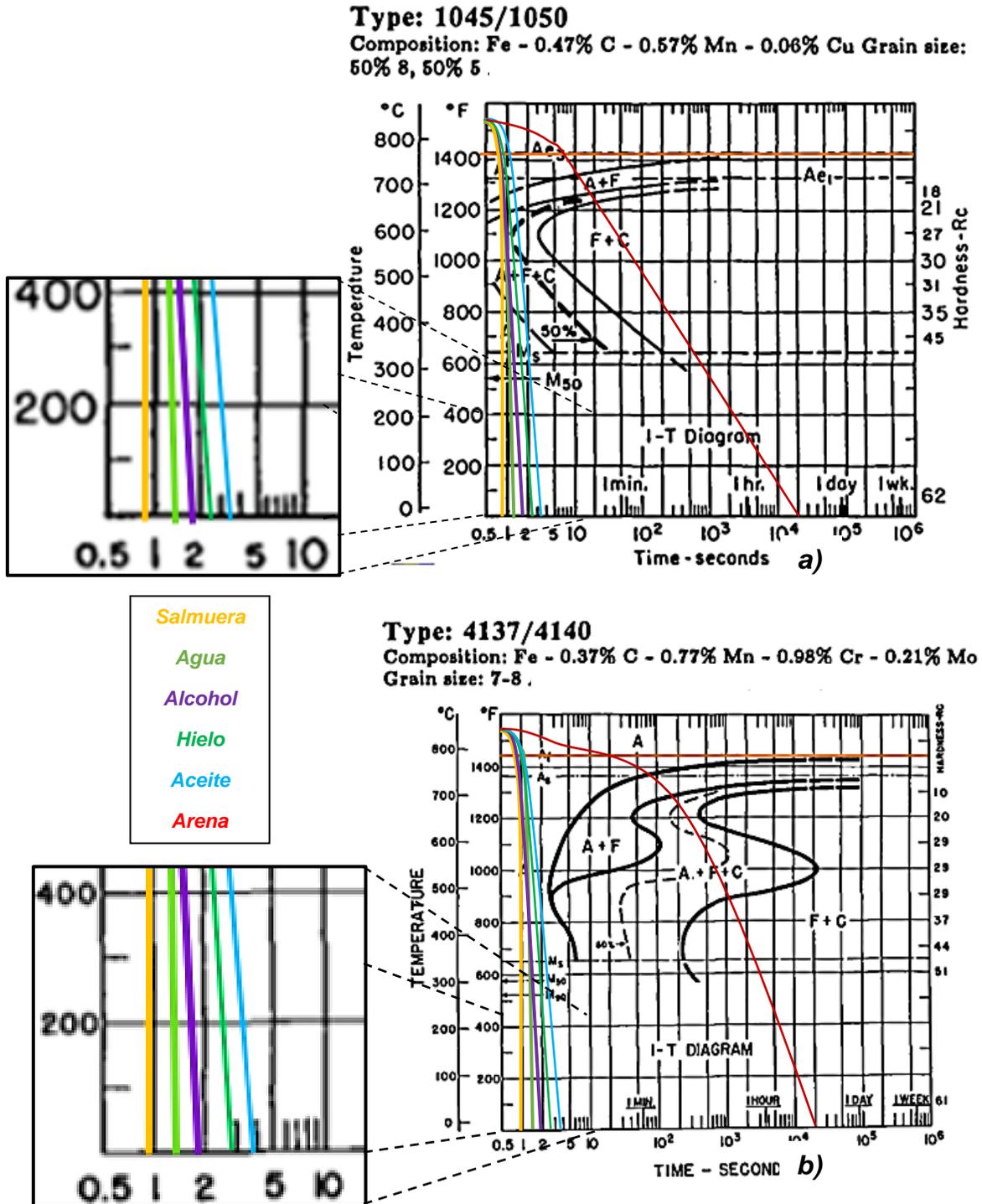
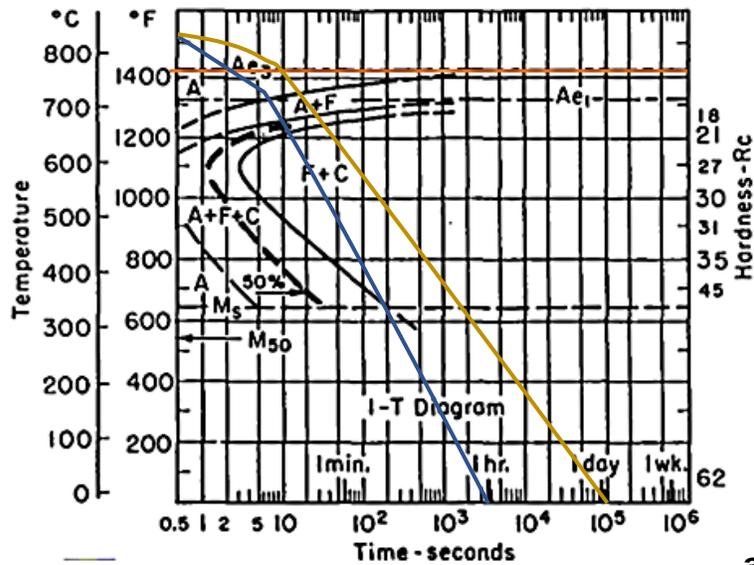


Figura 15. Curvas de enfriamiento para el temple en los aceros ⁴:
 a) SAE 1045 b) SAE 4140

Type: 1045/1050

Composition: Fe - 0.47% C - 0.57% Mn - 0.06% Cu Grain size: 50% 8, 50% 5 Austenitized at 843°C (1550°F)

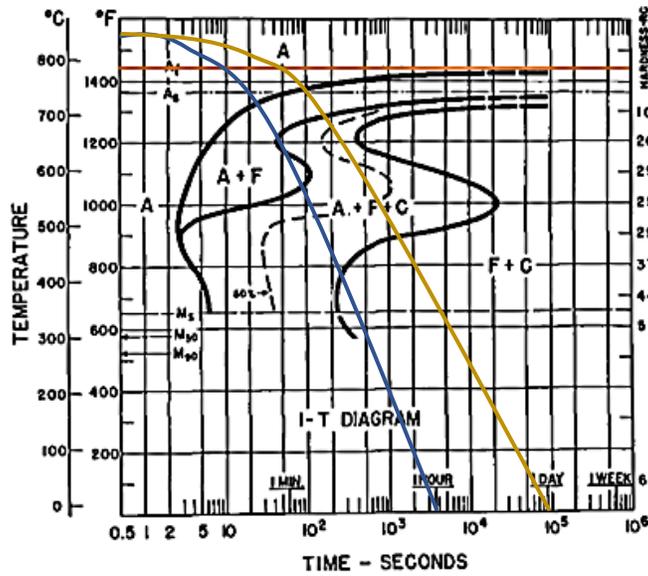


Aire ambiente
Aire caliente

a)

Type: 4137/4140

Composition: Fe - 0.37% C - 0.77% Mn - 0.98% Cr - 0.21% Mo Grain size: 7-8 Austenitized at 843°C (1550°F)



b)

Figura 16. Curvas de enfriamiento para el aire ambiente y caliente en los aceros⁴:

a) SAE 1045 b) SAE 4140.

II.3. Preparación metalográfica

El proceso de desbaste y pulido se llevó de manera convencional conforme a la norma ASTM E3, donde se utilizó papel abrasivo de carburo de silicio con una granulometría en secuencia de 60, 80, 120, 240, 360, 400, 600, 800 y 1200. Después del desbaste, fue pulida cada probeta con paño, empleando solución de alúmina como abrasivo²³.

II.3.1. Ataque químico

Se utilizó nital al 3% (mezcla de alcohol y ácido nítrico) como solución para el revelado de fases, por un tiempo promedio de aplicación de 3 segundos para la mayoría de piezas de ambas aleaciones. Es preciso seguir una metodología en el tiempo de ataque y uniformidad.

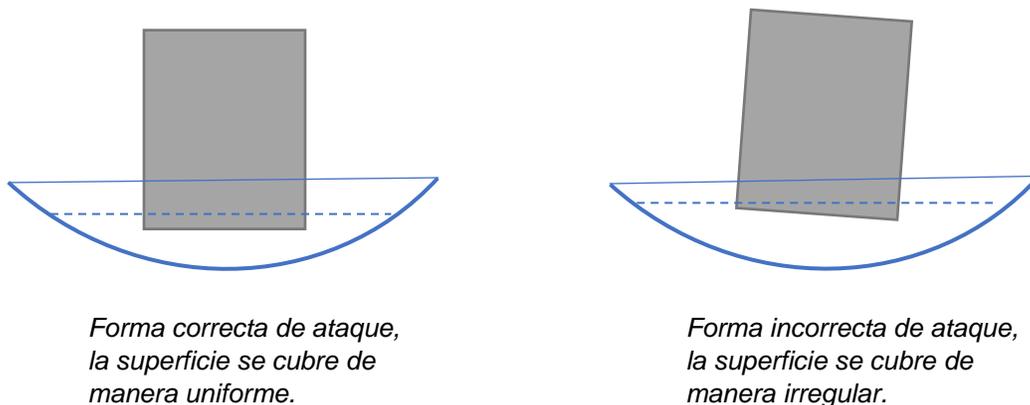


Figura 17. comparativa de las técnicas de ataque químico.

II.3.2. Medición de dureza y perfiles de profundidad.

En la figura 18 se observa el patrón de indentación realizado con la finalidad de obtener los valores de dureza en escala Rockwell B, desde el centro hacia la periferia, posteriormente se llevó a cabo un perfil de profundidad.

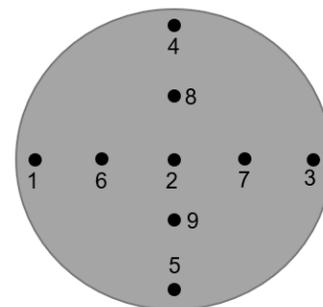


Figura 18. Patrón de indentaciones para la medición de durezas

II.3.2.1. Etapas de la prueba de dureza Rockwell B.

Primer etapa: el indentador debe presionar la pieza con la carga previa (10 kgf).

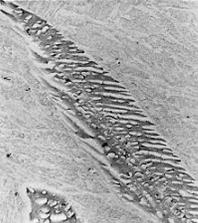
Segunda etapa: se aplica la fuerza adicional (100 Kgf) por un determinado tiempo de permanecía, logrando alcanzar la profundidad máxima.

Tercera etapa: una vez que se cumple el tiempo de permanencia, se deben retirar las cargas.²⁴

II.3.3. Cuantificación de fases

El software integrado al microscopio Keyence VHX 7000 permite realizar la metalografía cuantitativa, usando un sistema de diferenciación por escala de colores, contabilizando la colorimetría de cada una de las regiones; en las microestructuras de fases similares, como la martensita y la bainita, se basa en las características propias de cada una de ellas, la cuales se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Características de la martensita y bainita.

Fase	Sustancia	Temperatura	Clasificación	Mecanismo de formación	Microestructura	Características microestructurales
Martensita (M)	Solución sólida intersticial	220–330°C	- Láminas - Agujas	Adifusional		Láminas o agujas finas con un promedio en el ancho de 0.7 µm y en el largo de 16 µm.
Bainita (B)	Mezcla de fases (α + Fe ₃ C)	240–550°C	-Superior -Inferior	Cizallamiento + difusión		Tiene forma de "bainas" con un promedio en el ancho de 2 µm y largo de 18 µm.

II.4. Equipos

. Tabla 11. Equipos utilizados para los tratamientos y la caracterización de las probetas. ^{i10,i11,i12,i13,i14,i15,i16}

<i>Equipo</i>	<i>Imagen</i>
<i>Sierra cinta horizontal DAYSON</i>	 A horizontal band saw machine with a white and blue body, a large black motor, and a cutting arm.
<i>Mufla Lindberg 51894, temperatura máxima 1100°C</i>	 A large, industrial-grade furnace with a white front door and a brown side panel.
<i>Pulidora Buehler MetaServ 250 de discos</i>	 A dual-disk polishing machine with two circular grinding wheels and a control panel.
<i>Durómetro Buehler 3100</i>	 A vertical hardness testing machine with a digital display and a control panel.

<p><i>Microscopio metalográfico Nikon EIPHOT 200</i></p>	 A metallographic microscope with a white base and black top. It features a large objective lens, a stage with a circular opening, and a control panel on the front. A small white device is connected to the front.
<p><i>Microscopio óptico digital Keyence VHX 7000</i></p>	 A digital optical microscope with a black body and a large monitor. The monitor displays a colorful, textured surface. The microscope is mounted on a base with a control panel.
<p><i>Analizador elemental Keyence EA- 300 VHX Series</i></p>	 A vertical elemental analyzer with a black body and a large objective lens. It is mounted on a base with a control panel.

Capítulo III: Resultados y discusiones.

En este capítulo se presentan los resultados de los tratamientos térmicos aplicados y las conclusiones pertinentes.

III.1. Caracterización de las aleaciones.

Las probetas base y tratadas térmicamente de los aceros 1045 y 4140 utilizados en el presente estudio, fueron evaluadas y caracterizadas en su metalografía y dureza.

III.1.1. Probeta base

➤ SAE 1045

En las figuras 19 y 20, se observa la perlita, mostrando laminas gruesas, medias y finas. En la figura 21 se observa el espacio interlaminar entre la cementita y la matriz ferrítica de la perlita media. Se obtuvo una dureza promedio de 100.57 HR_b.

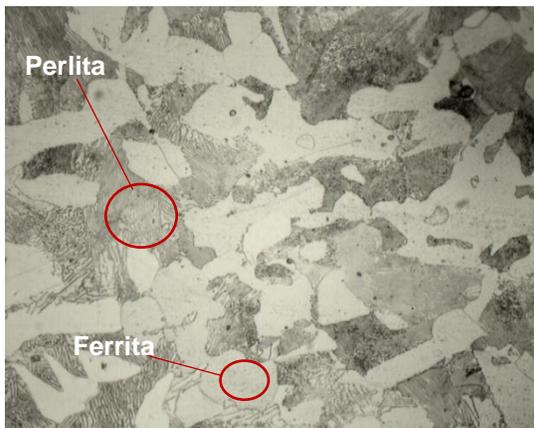


Figura 19. Acero 1045 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Fase oscura perlita y fase clara ferrita.

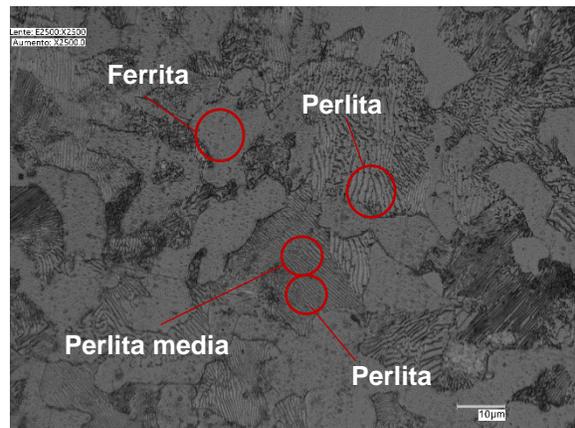


Figura 20. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Se muestran los 3 tipos de perlita laminar y ferrita.

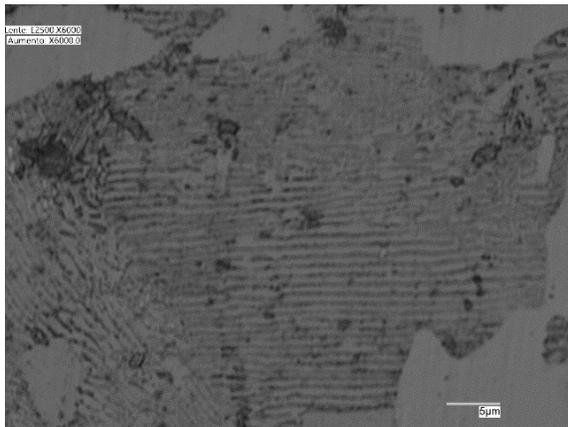


Figura 21. Acero 1045 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Espacio interlaminar entre cementita y la matriz ferrítica de la perlita media.

➤ **SAE 4140**

En las figuras 22 y 23, se observan regiones oscuras de martensita revenida y claras de ferrita. En la figura 24 se distingue la martensita revenida en la matriz ferrítica a 6000X. Se obtiene un promedio de 106.93 HR_b.



Figura 22. Acero 4140 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Región oscura de martensita revenida y clara de ferrita.

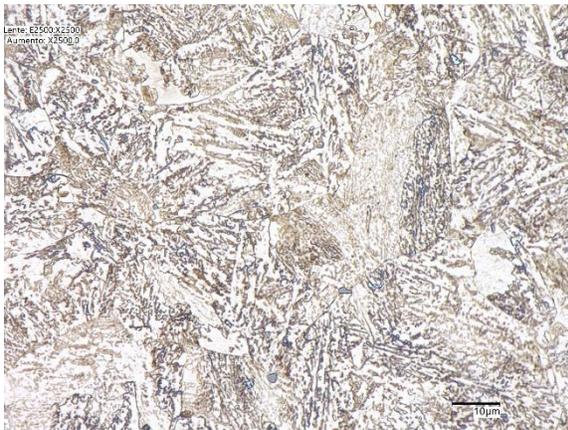


Figura 23. Acero 4140 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Región oscura de martensita revenida y clara de ferrita.

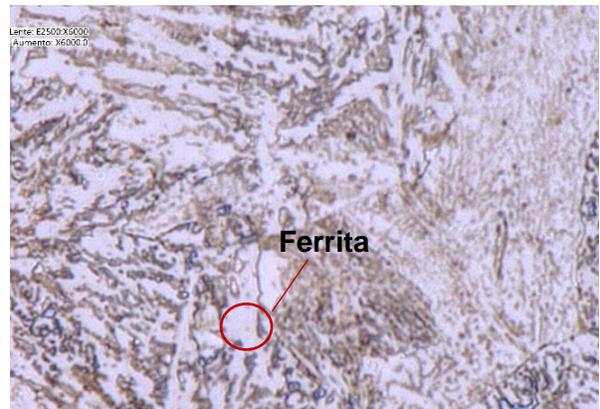


Figura 24. Acero 4140 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Martensita revenida sobre una matriz ferrítica.

En el grafico 1 se observan los resultados de dureza, de acuerdo al patrón de indentación de las dos probetas.

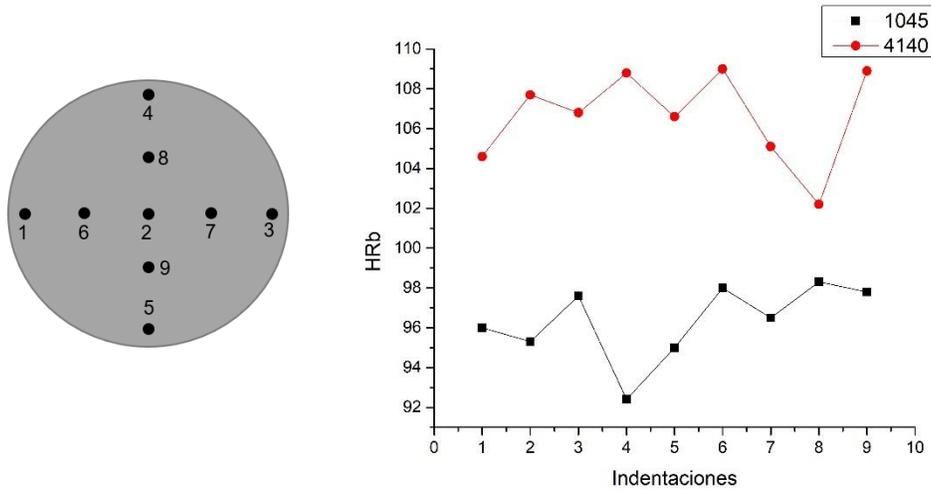


Gráfico 1. Valores de dureza de las probetas

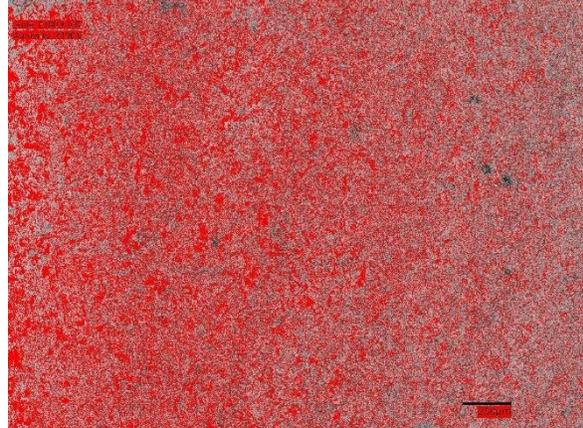
En el acero SAE 1045 se identifica una microestructura de perlita y ferrita formada durante su proceso de producción, en cambio, en el acero SAE 4140 se observa martensita revenida en una matriz ferrítica. La figura 25 muestra la cuantificación de fases en los dos aceros, en donde el 4140 presenta un promedio del 43% de ferrita, mientras que el 1045 un 48%.

SAE 1045

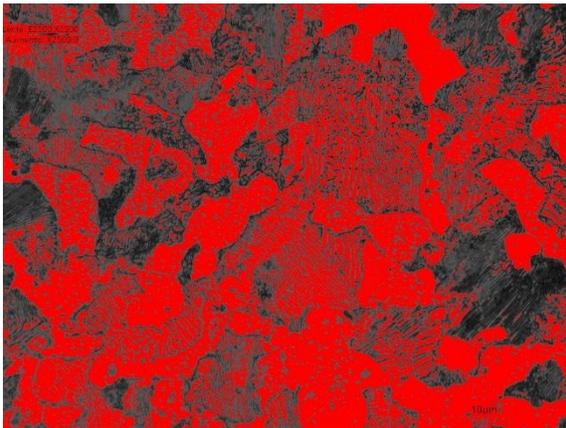


a) Se observa una región coloreada en rojo, a 100x del 42.66% referente a la ferrita, siendo el resto perlita.

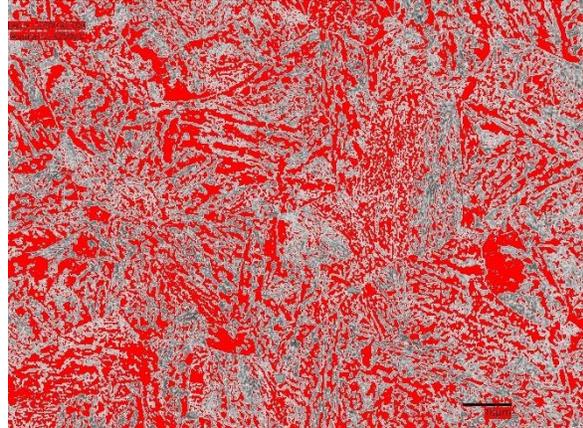
SAE 4140



b) Región marcada en color rojo a 100x correspondiente al 42.77% de ferrita, el resto es martensita revenida en color gris.



c) Se visualiza en rojo la región a 2500x donde el 48.33% corresponde a la ferrita, el resto es perlita.



d) La región coloreada en rojo de 42.82 % representa la ferrita con respecto a la martensita revenida, a 2500x.

Figura 25. Metalografías cuantitativas de los aceros base.

En la figura 26 se observa que el acero 1045 presenta una diferencia promedio del perfil de profundidad, de 16.98 μm respecto al 4140.

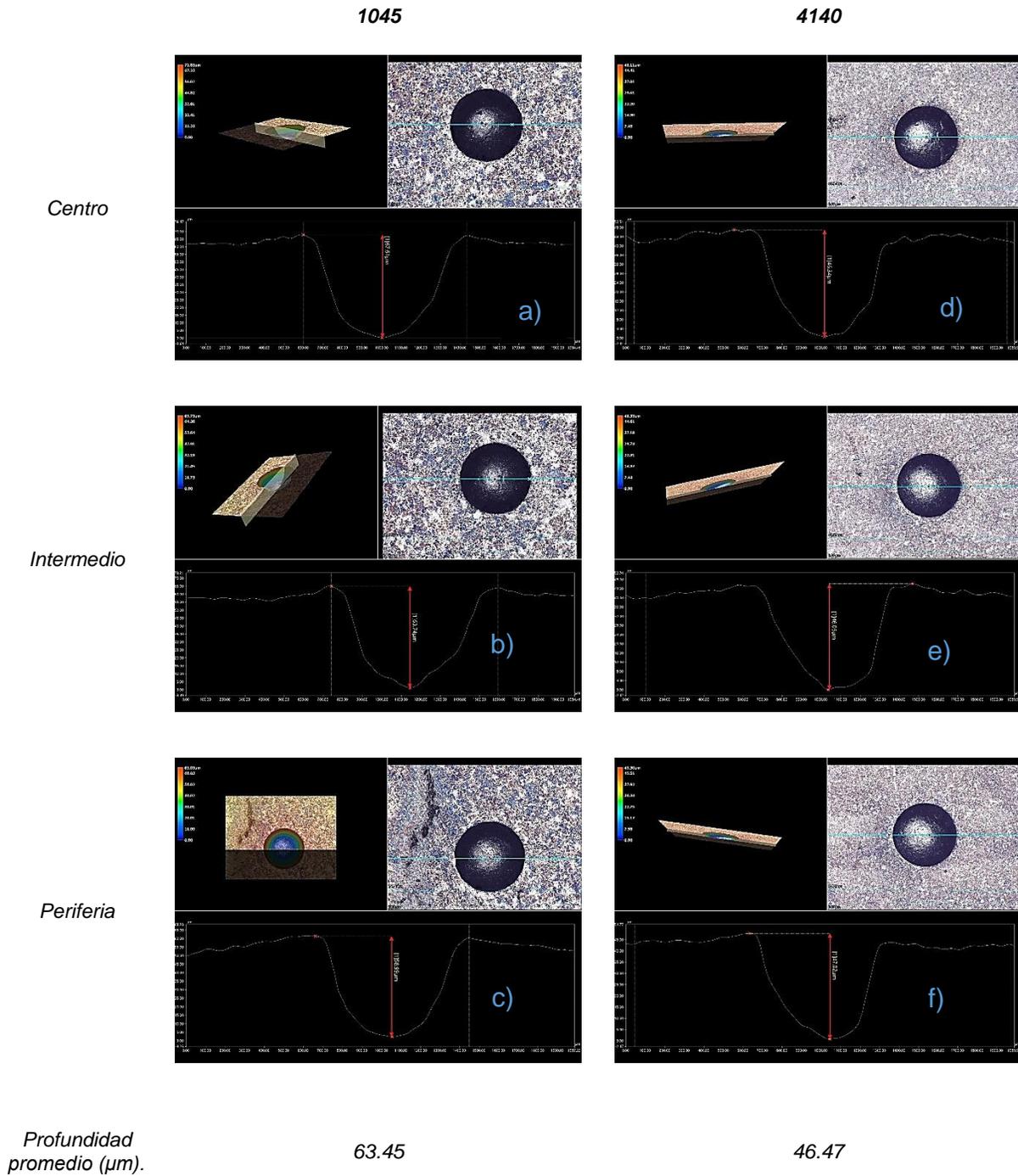


Figura 26. Perfiles de profundidad de los aceros base en las tres regiones.

III.1.2. Probetas con tratamiento térmico

III.1.2.1. Enfriamiento en Salmuera

➤ SAE 1045

Se observan colonias de martensita y bainita en las figuras 27 y 28, siendo en esta última a 2500X, donde existe una mayor definición de las fases. En la figura 29 se realizó la medición del tamaño de las fases martensita y bainita. El valor de dureza que se obtuvo en la probeta es de 108.71 HR_b.

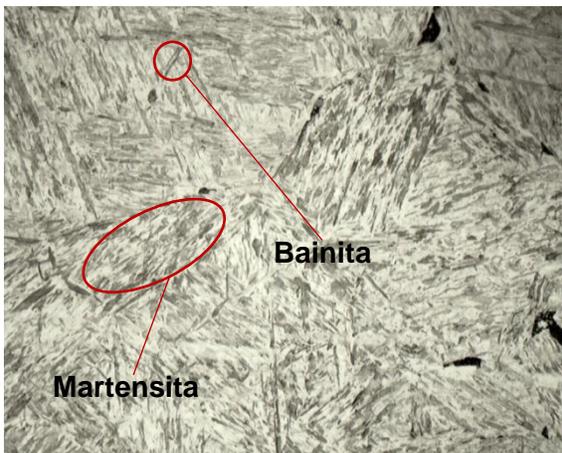


Figura 27. Acero 1045 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.



Figura 28. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.



Figura 29. Acero 1045 a 6000X/Nital 3%/3s/Keyence. Medición de tamaño de la martensita y bainita.

➤ **SAE 4140.**

La figura 30 muestra colonias de martensita y bainita, en la figura 31 a 2500X se distinguen mejor las fases de martensita y bainita; para esta aleación, en la figura 32 se observan puntos negros de sulfuro de hierro II, que fueron relacionados a los similares encontrados en el análisis puntual de la figura 55 en la probeta enfriada en alcohol.

En la figura 33, se midió la longitud de la martensita en las regiones marcadas en morado y verde; para la bainita se midió lo ancho de las bainas, indicadas en color amarillo y azul; se obtiene una dureza de 122.67 HR_b.

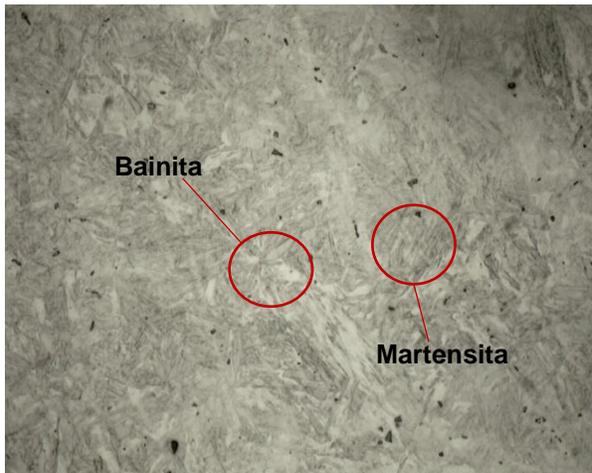


Figura 30. Acero 4140 a 1000X/Nital 3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.



Figura 31. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.



Figura 32. Acero 4140 a 100X/Nita3%/3s/Nikon. Puntos negros de sulfuro de hierro II.

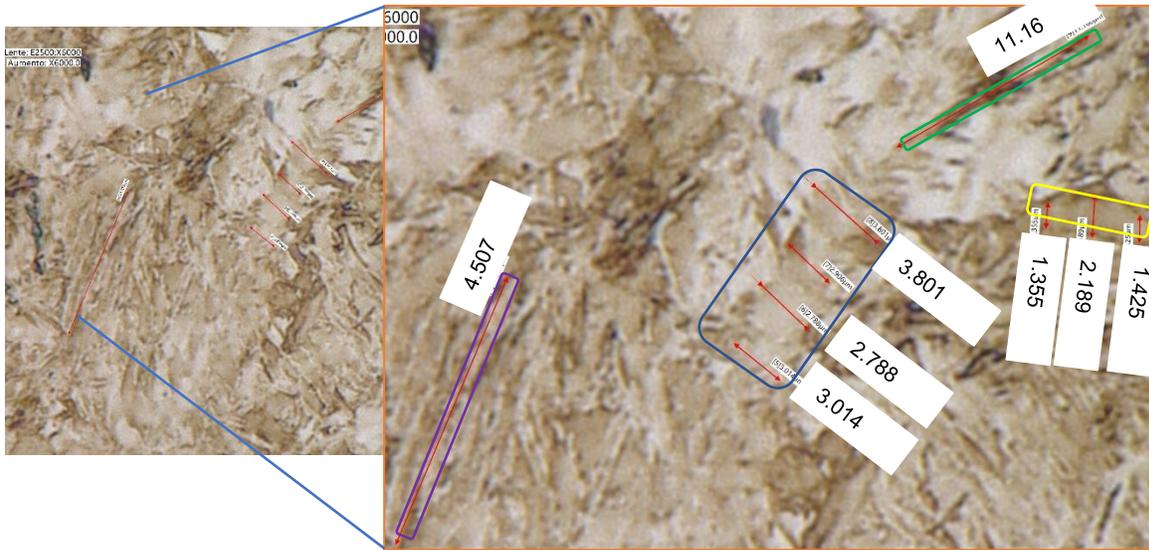


Figura 33. Acero 4140 a 6000X/Nita3%/3s/Keyence. Medición de martensita y bainita.

En el gráfico 2, se presentan los valores de dureza de los dos aceros, observando que en promedio hay una diferencia entre ellos de 12 unidades.

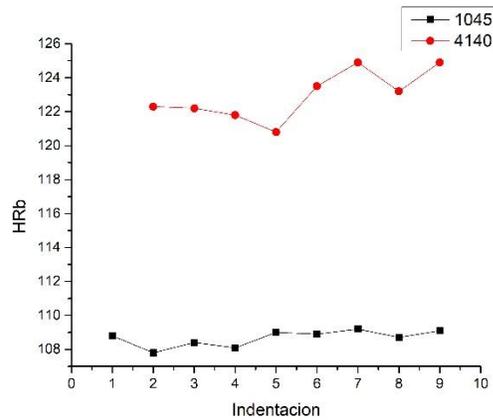
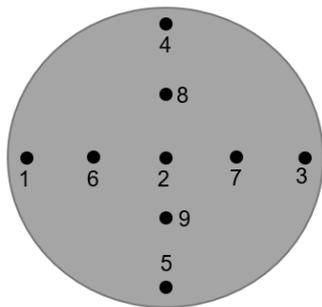
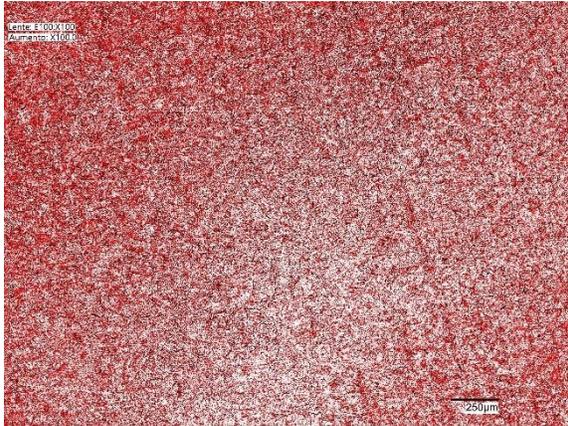


Gráfico 2. Valores de dureza después del enfriamiento en salmuera.

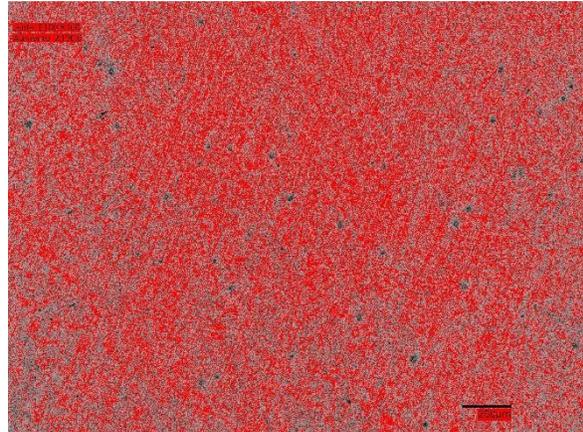
En la figura 34 se observa martensita y bainita en los dos aceros, después de realizar la cuantificación, se determina que existe un mayor porcentaje de bainita en el acero SAE 1045.

SAE 1045

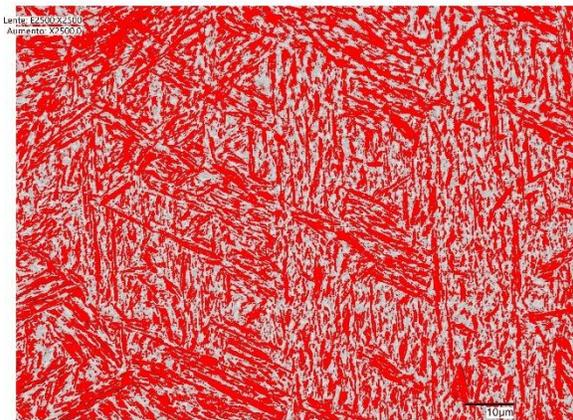


a) Se identifica una región a 100x de 37.19% en rojo, en donde se observa una mezcla de bainita y martensita.

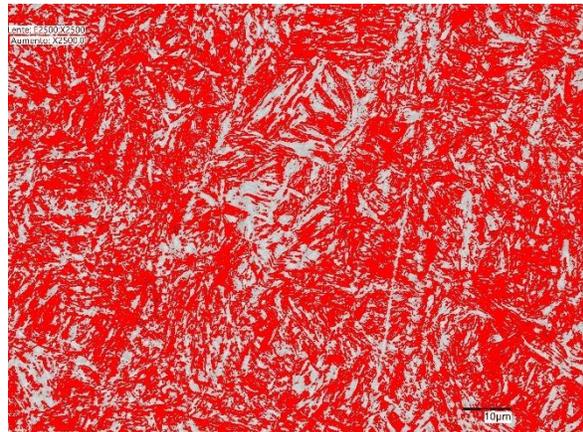
SAE 4140



b) Región marcada en rojo a 100x correspondiente al 47.14%, se distingue bainita y martensita en rojo.



c) Se observan a 2500X regiones en color rojo de bainita que corresponden a un 47.33% y resto martensita.



d) Se observan a 2500X regiones en color rojo de bainita que corresponden a un 49.10% y resto martensita.

Figura 34. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en salmuera

En la figura 35 se observa que la profundidad promedio del acero 1045 tiene una diferencia 1.25 μm respecto al 4140.

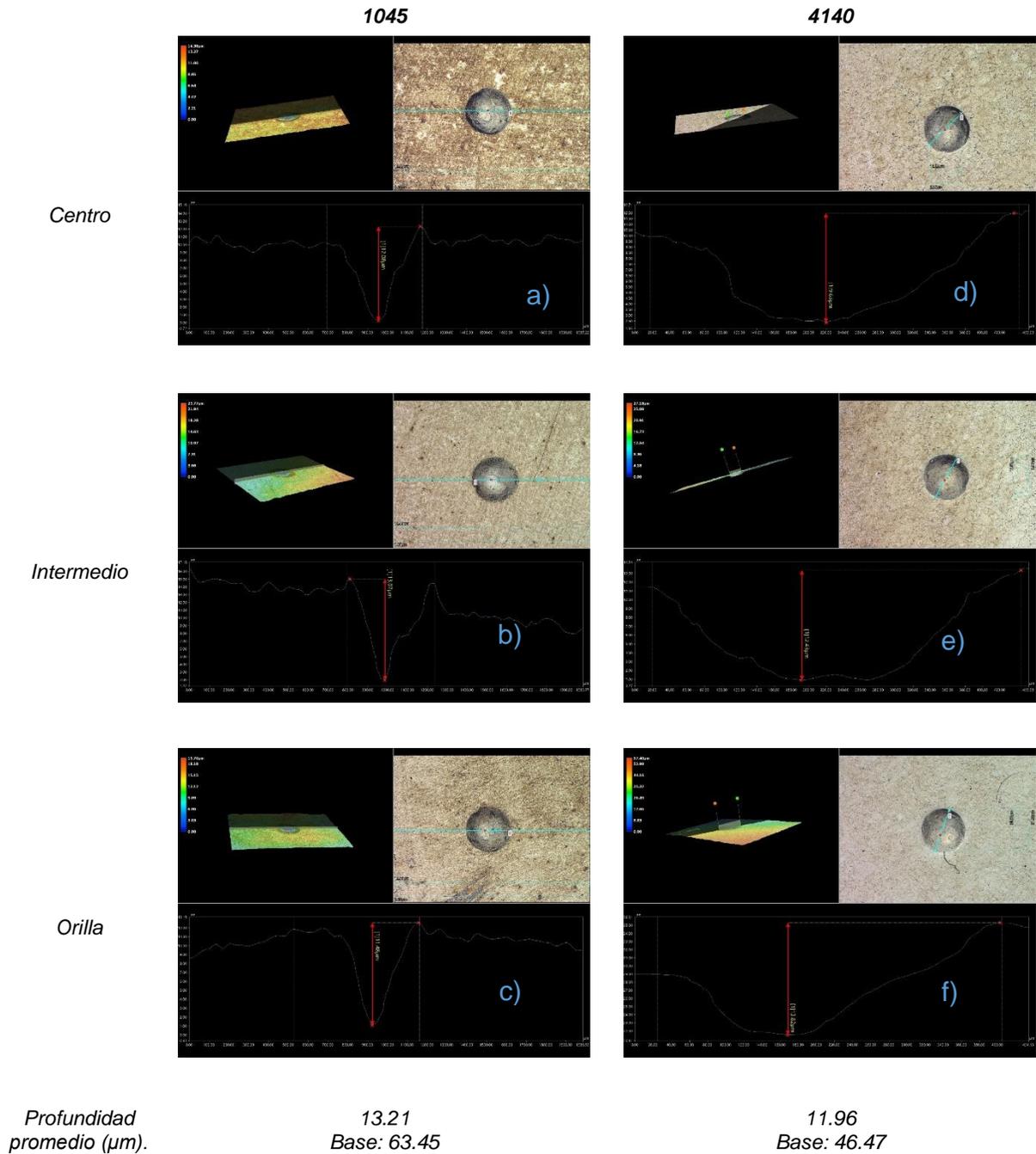


Figura 35. Perfiles de profundidad del enfriamiento en salmuera.

III.1.2.2 Enfriamiento en agua

➤ SAE 1045

En la figura 36 a 1000X se observa bainita y martensita; en la figura 37 a 2500X se mide el ancho y largo de una bainita. A 100X se observó que en los límites de grano existen colonias de perlita, como se muestra en la figura 38; en la figura 39 a 6000X se midió la longitud de la martensita, esta probeta presenta una dureza promedio de 106.54 HR_B.

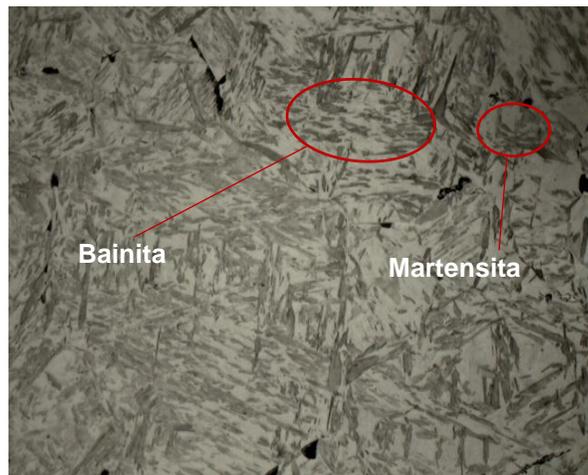


Figura 36. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon, Colonias de martensita y bainita.

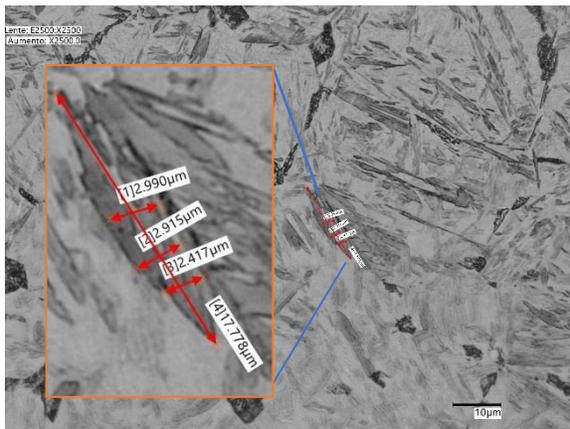


Figura 37. Acero 1045 a 2500X/Nital 3%/3s/Keyence. Medición de bainita.

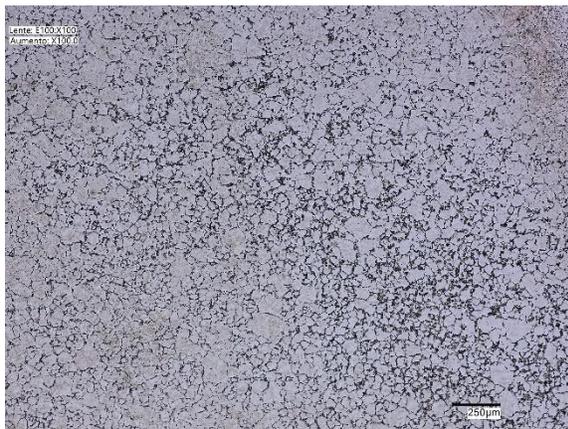


Figura 38. Acero 1045 a 100X/Nital3%/3s/Keyence. Puntos negros de las colonias de perlita

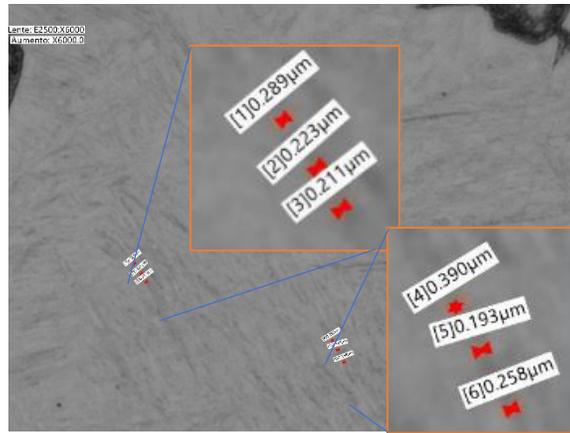


Figura 39. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de martensita.

➤ SAE 4140

La severidad de temple de este medio produjo fracturas en la superficie, como las que se observan en la figura 40, en la figura 41 a 300x se midió la profundidad de una de las grietas de 33.67 µm hasta el punto más bajo. En la figura 42 a 1000X se identifican las fases de martensita y bainita; en la figura 43 a 2500X se definen mejor las fases de martensita, y bainita; como se aprecia en la figura 44 a 6000X, se midieron las fases mencionadas incluyendo el ángulo de formación de la martensita. La dureza medida es de 123.97HR_b.



Figura 40. Acero 4140 a 20X/Nital3%/3s/Keyence. Fracturas en la pieza

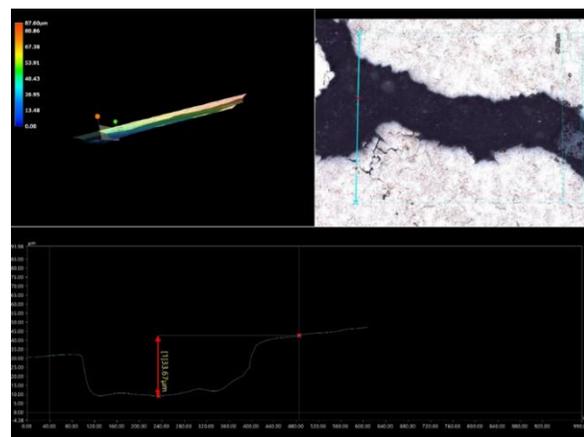


Figura 41. Acero 4140 a 300X/Nital3%/3s/Keyence. Perfil de profundidad de la fractura.

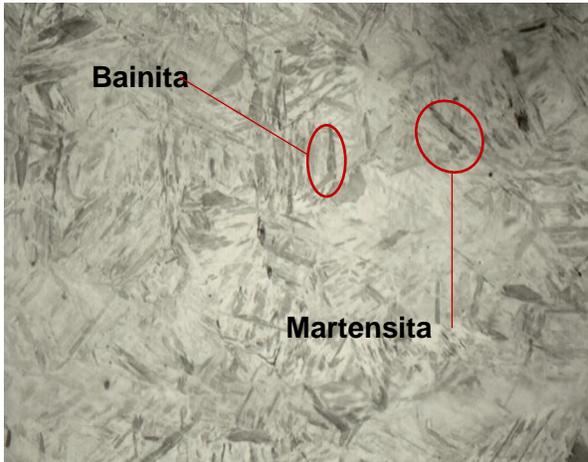


Figura 42. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.

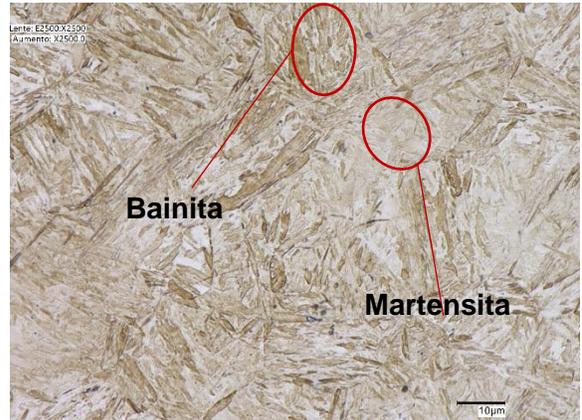


Figura 43. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.

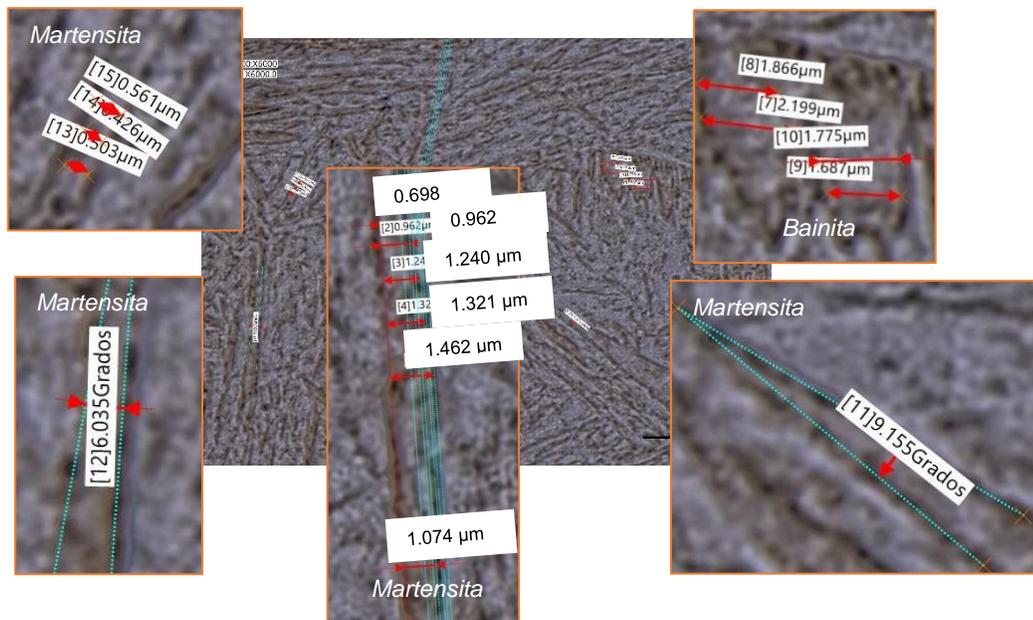


Figura 44. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de martensita y bainita.

En el grafico 3 se muestran los valores de dureza de las dos probetas, en donde el acero 4140 presenta solo 3 valores debido a las fracturas mencionadas, se calcula una diferencia promedio de 14 unidades.

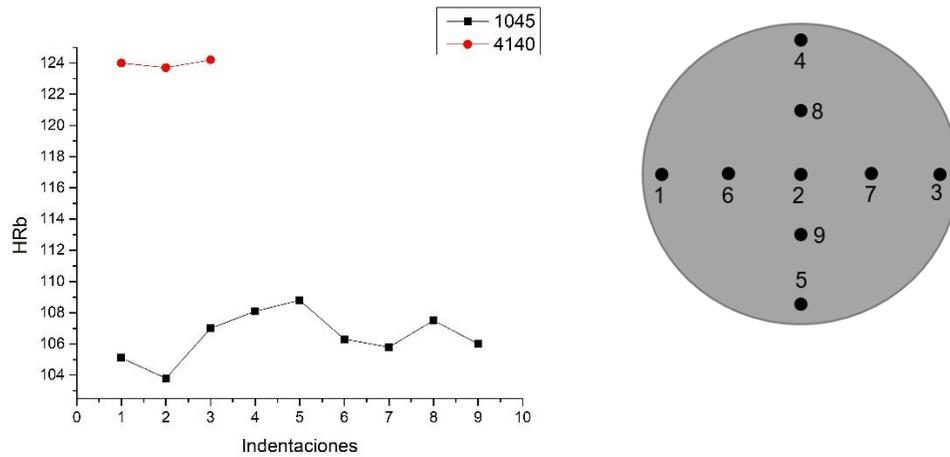
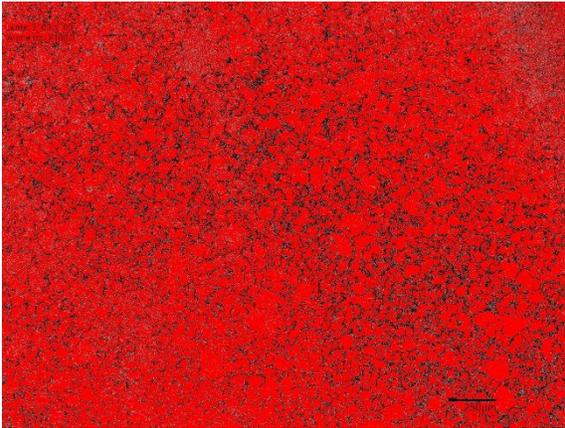


Gráfico 3. Valores de dureza después del enfriamiento en agua.

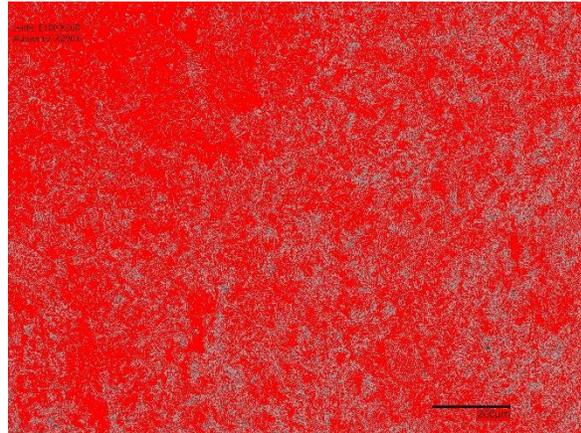
En la figura 45 se observan martensita y bainita en los dos aceros, la cuantificación revela que existe un mayor porcentaje de bainita en el acero 4140.

SAE 1045

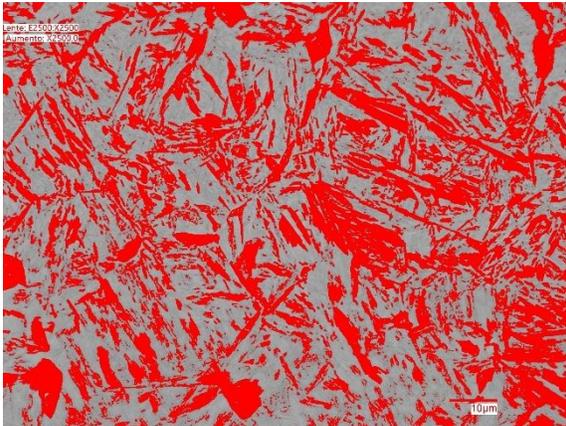


a) La región en rojo a 200x representa el 71.88%, hace referencia a la martensita y bainita

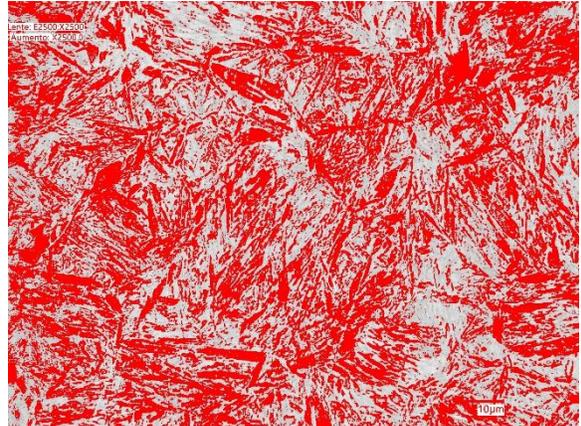
SAE 4140



b) Se señala una región de 71.73% en rojo a 200x donde los granos pertenecen a la mezcla de martensita y bainita.



c) La región indicada a 2500X en rojo corresponde al 40.38% en donde se identifica bainita y resto martensita.



d) La región indicada en color rojo a 2500X, representa el 47.26%, se observa bainita y resto martensita.

Figura 45. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en agua.

El acero 1045 presenta una diferencia de 20.7 μm en la profundidad promedio respecto al 4140, debido a las fracturas formadas en el acero 4140, fue posible realizar solo 3 mediciones de dureza, 2 en los extremos y 1 en el centro.

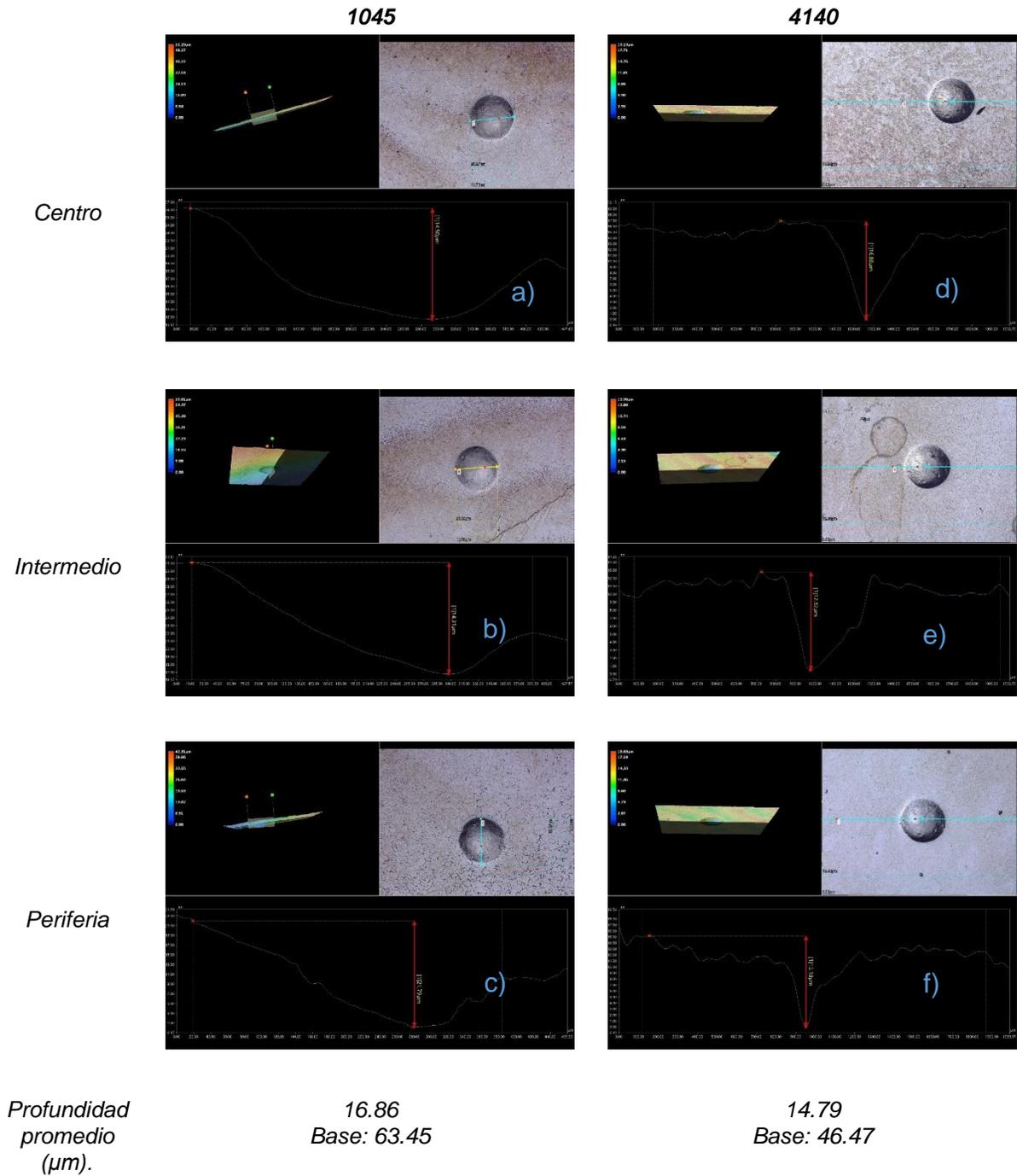


Figura 46. Perfiles de profundidad del enfriamiento en agua.

III.1.2.3. Enfriamiento en Alcohol

➤ SAE 1045

En el diagrama TTT del SAE 1045 de la figura 15 se observa que la curva de enfriamiento intercepta la región perlítica, lo cual se comprueba en la figura 47 a 1000X, estas fases se identifican con mayor definición a 2500X en la figura 48; en la figura 49 a 6000X, se realizaron mediciones del espacio interlaminar de la perlita con un promedio entre la perlita gruesa y media de $0.494 \mu\text{m}$, además del ancho de la ferrita primaria, con un valor promedio de $1.15 \mu\text{m}$. En la probeta se obtiene un valor de dureza de 108.49 HR_b .

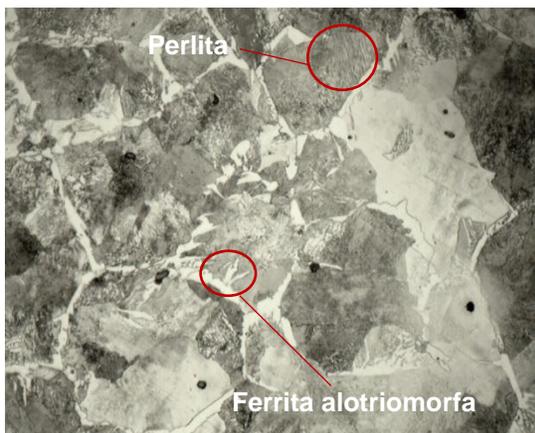


Figura 47. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita y ferrita primaria (alotriomorfa).

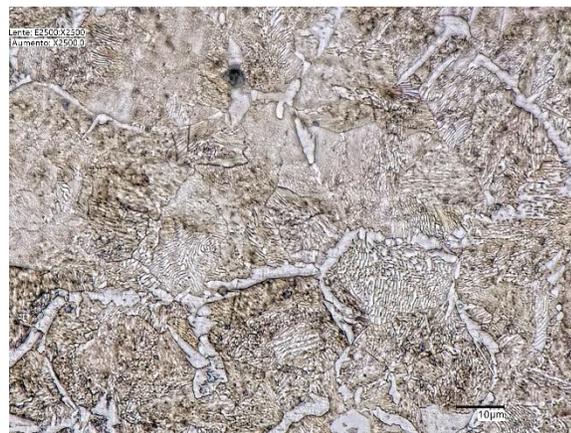


Figura 48. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.

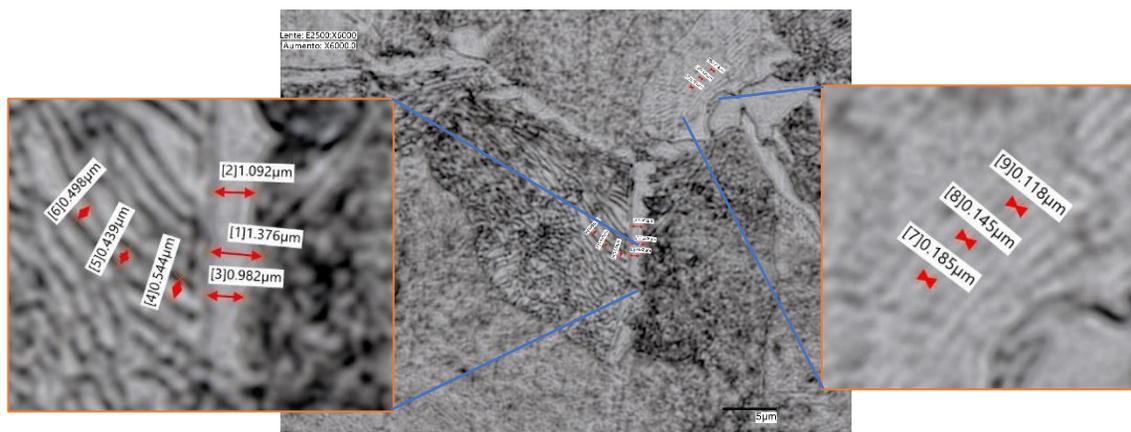


Figura 49. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición del espacio interlaminar entre la ferrita y cementita.

➤ **SAE 4140**

Como se observa en la figura 50, en este medio también se forman fracturas, aunque en menor grado comparado al agua, la figura 51 muestra el perfil de profundidad de la fractura de 7.00 μm ; en la figura 52 a 1000X se muestran colonias de martensita y bainita, mismas que se ven más definidas en la figura 53 a 2500X. Se midió el ancho de la bainita con un promedio de 2.087 μm y la longitud de la martensita de 13.648 μm , esto se observa en la figura 54 a 6000X. El valor de dureza promedio en esta probeta es de 123.34 HR_b.



Figura 50. Acero 4140 a 30X. Grietas en la pieza después del temple.

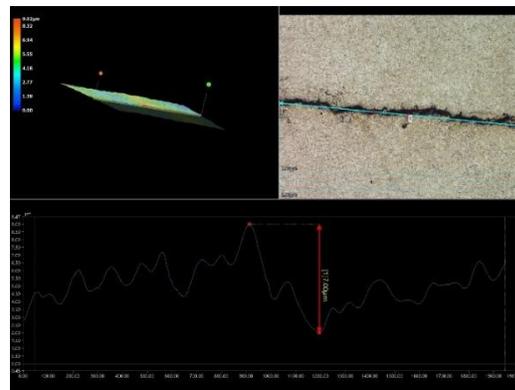


Figura 51. Acero 4140 a 300X/Nita3%/3s/Keyence Perfil de profundidad de la grieta en la superficie.



Figura 52 Acero 4140 a 1000X/Nita3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.



Figura 53. Acero 4140 a 2500X/Nita3%/3s/Keyence. Colonias de martensita y bainita.

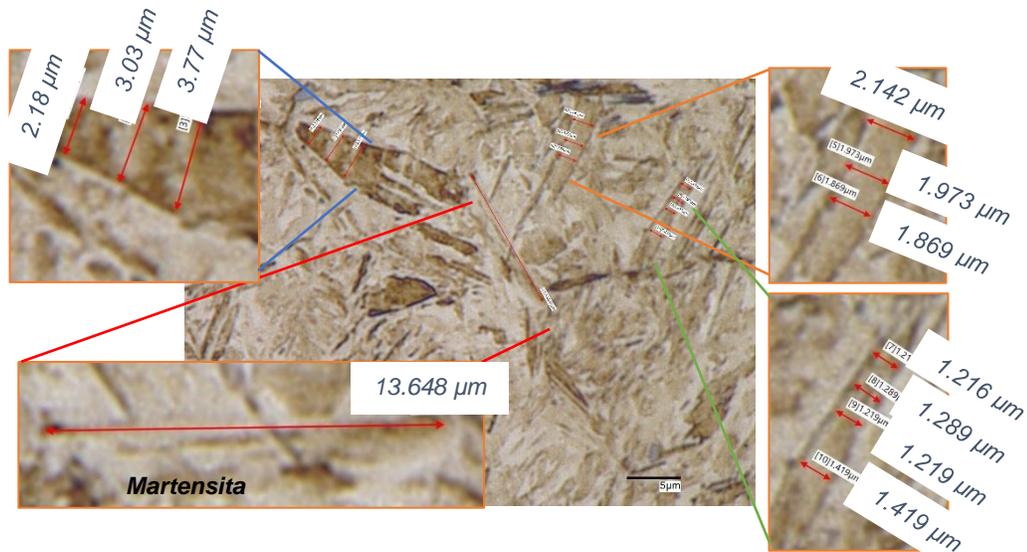


Figura 54. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de aguja de martensita y bainita.



Tabla 12. Composición química por análisis puntual.

Elementos	Porcentaje
Fe	81.8
S	6.6
Si	6.4
Cr	5.2
P	ND
Mn	ND
Mo	ND

Figura 55. Acero 4140 a 300X/Nital3%/3s/Keyence. Análisis puntual de composición química, a 300x.

En la figura 55 se observan inclusiones que quedan incrustadas por el enfriamiento durante el temple, como se sabe, estas proporcionan fragilidad y son un punto de origen para la formación de grietas; se realizó la identificación por medio del análisis puntual en el analizador elemental “KEYENCE EA-300 VHX Series”, demostrando la presencia de sulfuro de hierro II, los resultados del análisis elemental se muestran de la tabla 12.

En el gráfico 4, se presentan los valores de dureza de los dos aceros, en donde los valores del SAE 4140 son similares entre si, se calcula una diferencia promedio de 13 unidades respecto al 1045, este último no presenta fracturas.

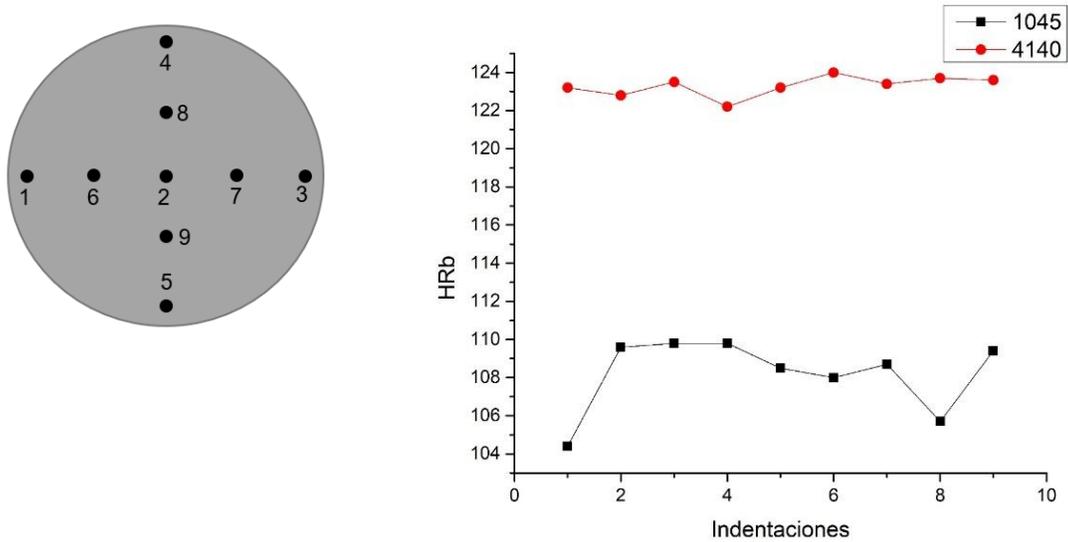
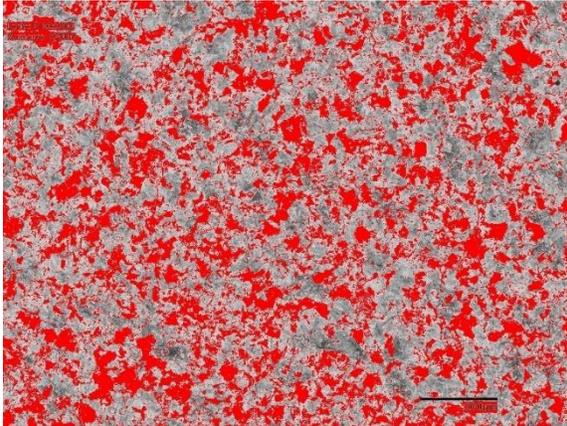


Gráfico 4. Valores de dureza después del temple en alcohol.

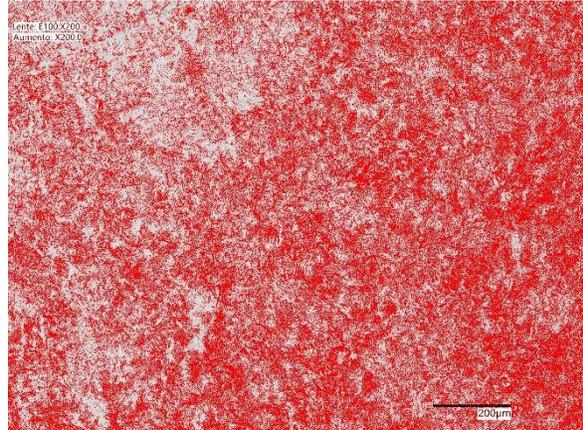
En la figura 56, después de la cuantificación, el acero 4140 muestra un 44% de bainita y el resto martensita, mientras que el 1045 revela 65.5% de perlita y lo restante ferrita.

SAE 1045

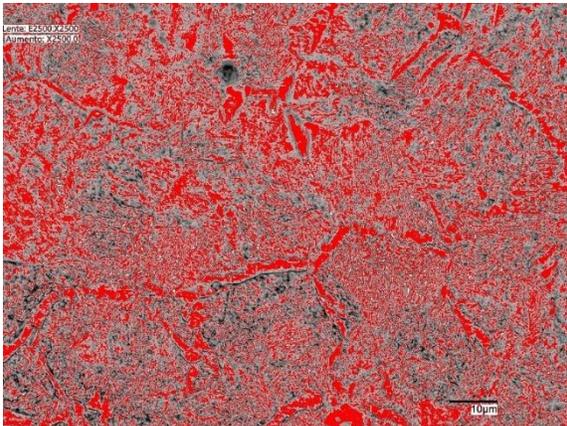


a) La región identificada en rojo a 200X de 38.34% corresponde a la ferrita, lo restante es perlita.

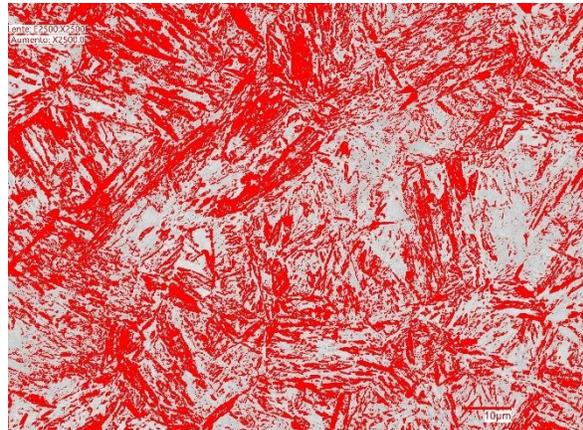
SAE 4140



b) Se marca en rojo a 200X la región de 48.05%, donde se observa la mezcla de martensita y bainita.



c) Se presenta la región en rojo a 2500X correspondiente al 34.50% de ferrita, lo demás es perlita.



d) Se observa la región en color rojo a 2500X perteneciente al 44.05% de bainita y resto martensita.

Figura 56. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en alcohol.

En la figura 57, se observa que el acero 1045 muestra una diferencia en la profundidad promedio de las tres regiones analizadas de 35.04 μm respecto al 4140.

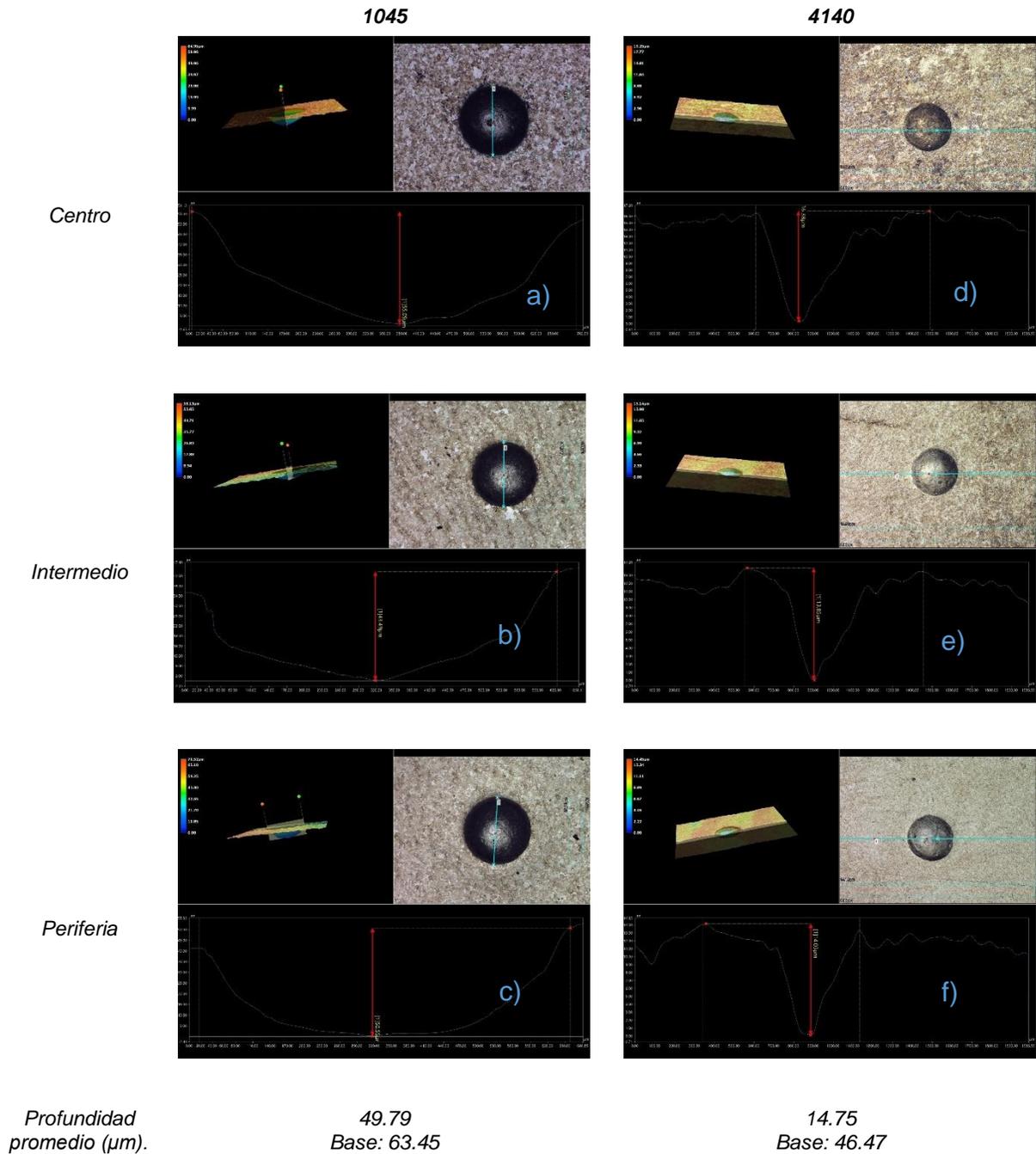


Figura 57. Perfiles de profundidad del enfriamiento en alcohol.

III.1.2.4. Enfriamiento en Hielo

➤ SAE 1045

La curva de enfriamiento en el diagrama TTT de la figura 15, atraviesa diferentes regiones de transformación, ferrita, perlita, bainita y martensita, las cuales se observan en la figura 58 a 1000X, donde se presenta ferrita alotriomorfa; en la figura 59 a 2500X los diferentes granos claros corresponden a la ferrita alotriomorfa y Widmanstatten, mientras que los granos con diferentes tonalidades oscuras contienen perlita, bainita y martensita; en la figura 60 a 6000X, fue posible medir la ferrita Widmanstatten, característica por sus formas alargadas. En la probeta se obtiene una dureza de 108.33 HR_B.

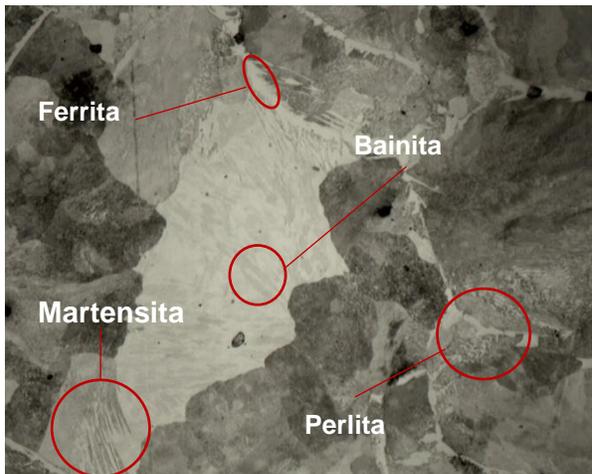


Figura 58. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita, ferrita, martensita v bainita.



Figura 59. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Ferrita Widmanstatten,

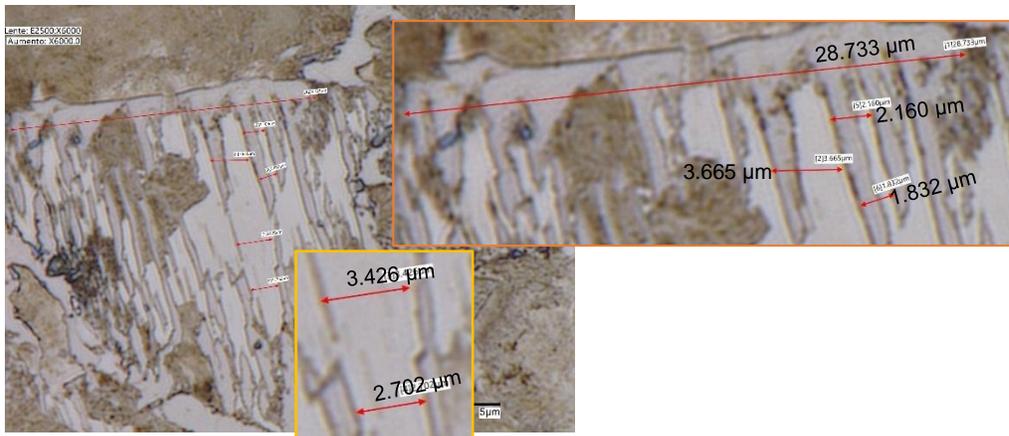


Figura 60. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Mediciones de ferrita Widmanstatten

➤ **SAE 4140**

En la figura 61 a 1000X se observa ferrita primaria, perlita, y bainita; en la figura 62 a 2500X se distingue ferrita en color blanco y perlita en color café; en la figura 63 a 6000X durante el barrido en una zona específica fue observada y medida la estructura Widmanstatten con un ancho promedio de 0.240 μm . La dureza obtenida en la probeta es de 121.91 HR_B.

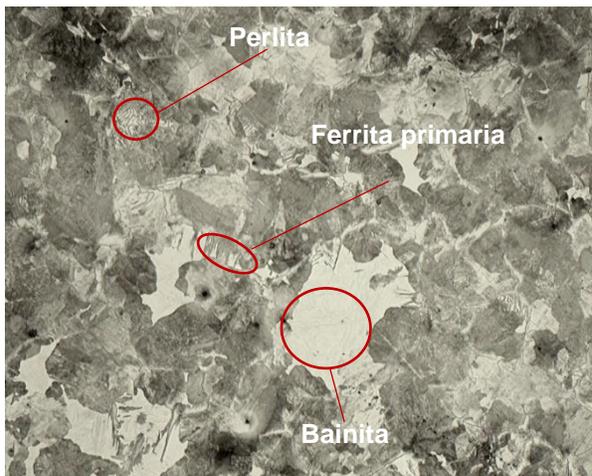


Figura 61. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2.5s/Nikon. Bainita, perlita y ferrita primaria.

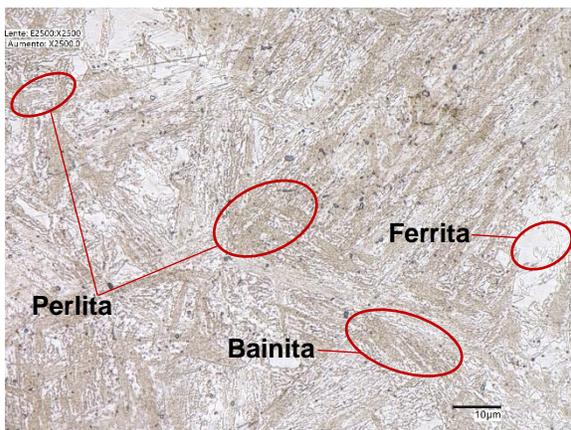


Figura 62. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2.5s/Keyence. colonia de perlita, bainita y ferrita.

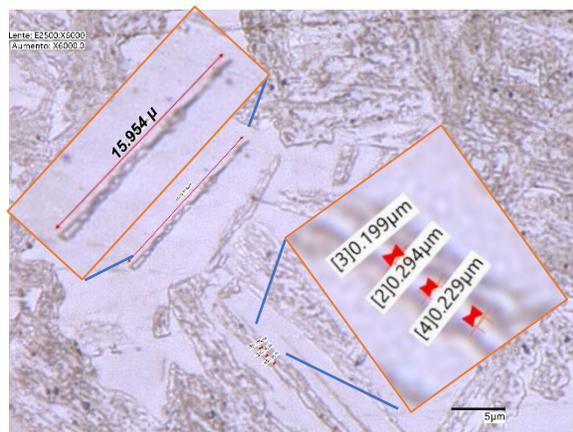


Figura 63. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2.5s/Keyence estructura Widmanstatten.

Observando los valores de dureza en el gráfico 5, se calcula para los aceros una diferencia promedio de 13 unidades.

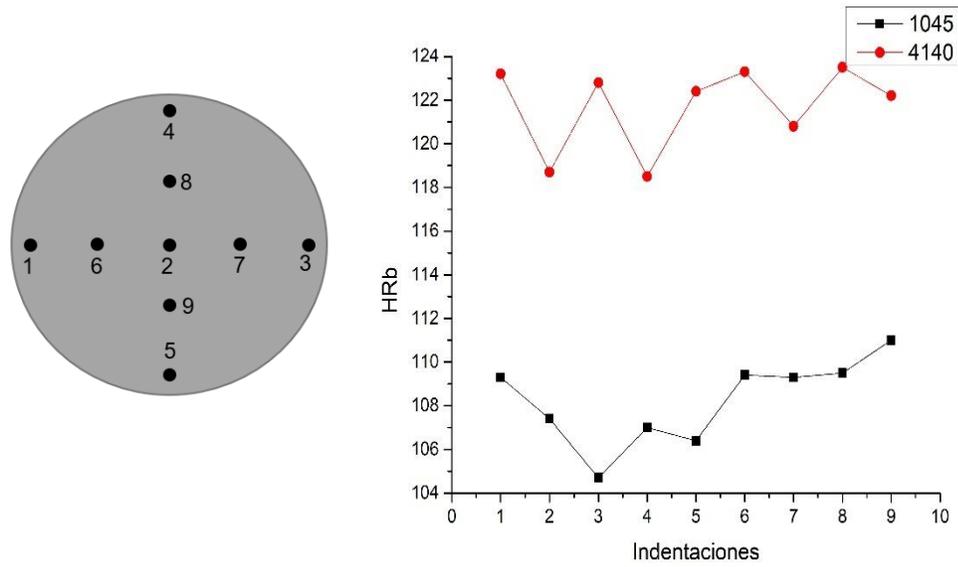
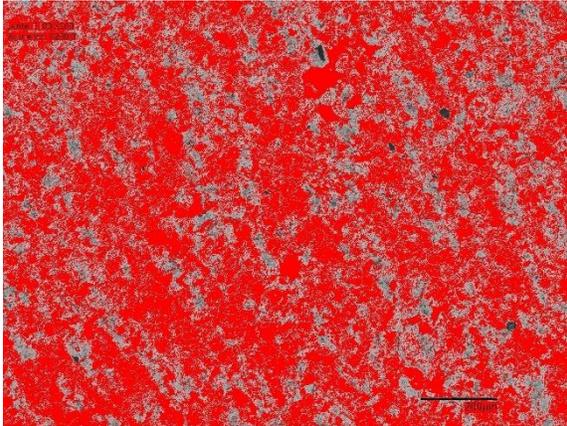


Gráfico 5. Valores de dureza después del temple en hielo.

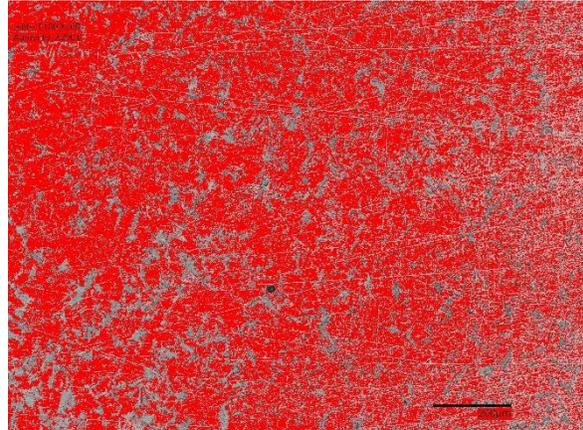
En la figura 64, después de realizar la cuantificación de fases, el acero 4140 muestra un porcentaje del 2.39% de ferrita menor al del 1045.

SAE 1045

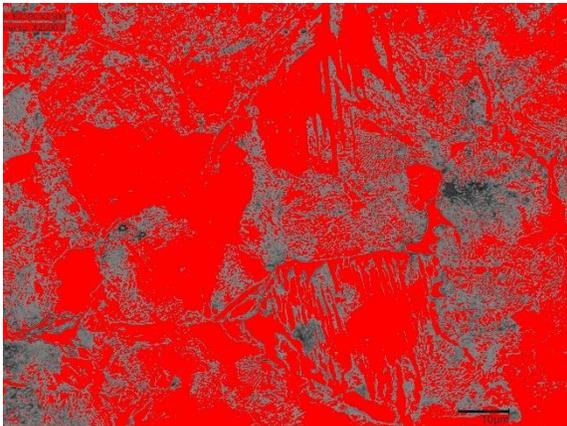


a) Se señala en color rojo a 100x la región de 62.78% de ferrita, el resto es perlita.

SAE 4140



b) Se observa la región en color rojo a 200x de 62.07% donde se encuentra ferrita, lo restante es perlita.



c) Se observa la región a 2500x marcada en rojo del 66.69% correspondiente a la ferrita, lo demás pertenece a la perlita.



d) En la región coloreada en rojo a 2500x del 64.30 % correspondiente a la ferrita, lo demás es perlita

Figura 64. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en hielo.

En la figura 65, los perfiles de las tres regiones con mayor profundidad se encuentran en el acero 1045, con una diferencia en la profundidad promedio de 26.32 μm respecto al 4140.

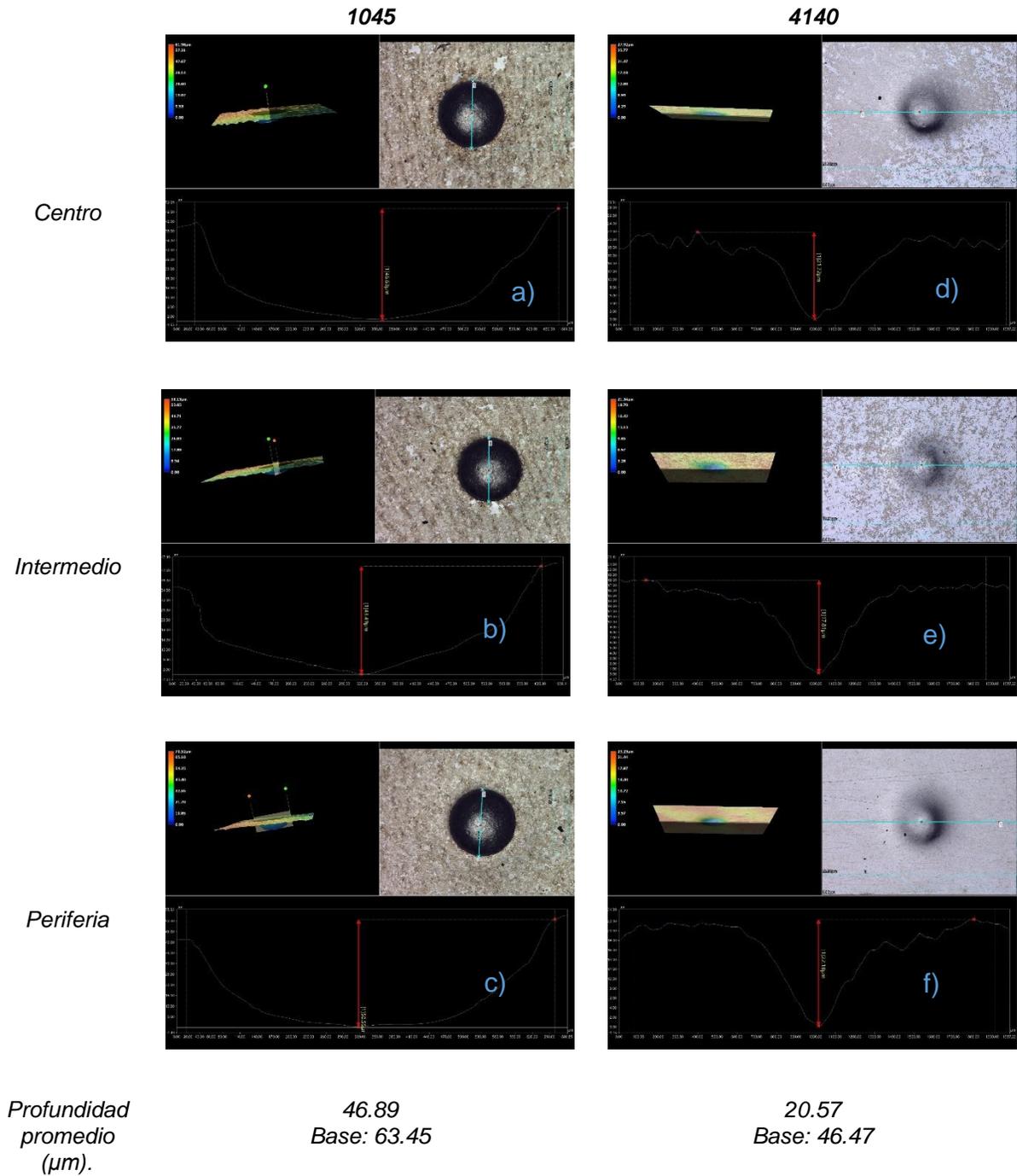


Figura 65. Perfiles de profundidad después del enfriamiento en hielo.

III.1.2.5. Enfriamiento en Aceite

➤ SAE 1045

En la figura 66 se distinguen granos claros de ferrita y estructura de Widmanstatten, mientras que los más oscuros corresponden a la perlita; en la figura 67 se identifican más ejemplares de la ferrita Widmanstatten, su forma de aguja se aprecia en la figura 68. Después de medir la dureza, se obtiene un valor HR_b de 105.51

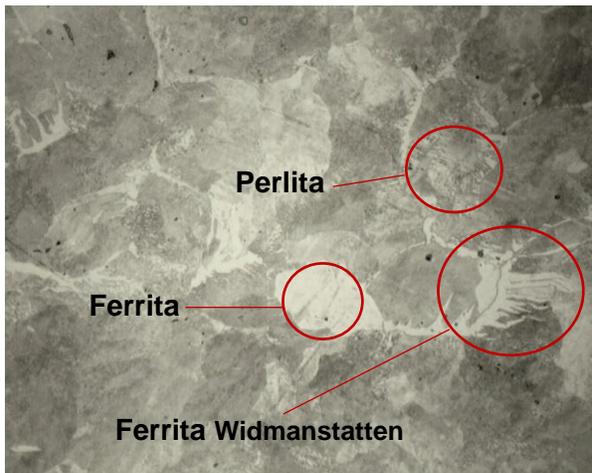


Figura 66. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Perlita, ferrita y ferrita Widmanstatten



Figura 67. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Ferrita Widmanstatten.



Figura 68. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Ferrita Widmanstatten.

➤ **SAE 4140**

En la figura 69 se identifica martensita y bainita, pero en la figura 70 a 2500X se observan con mejor resolución; en las figuras 71 y 72 se muestran los resultados de medición del ancho para la bainita con un promedio de 1.180 μm y del largo para la martensita con una longitud promedio de 15.608 μm . Se obtiene un valor de dureza de 121.51 HR_b en la probeta.

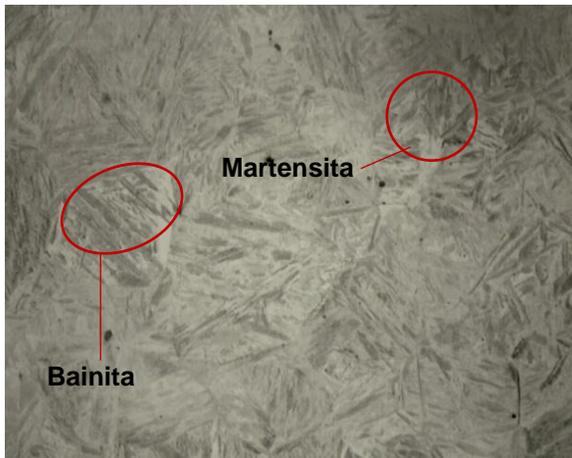


Figura 69. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Colonias de martensita y bainita.

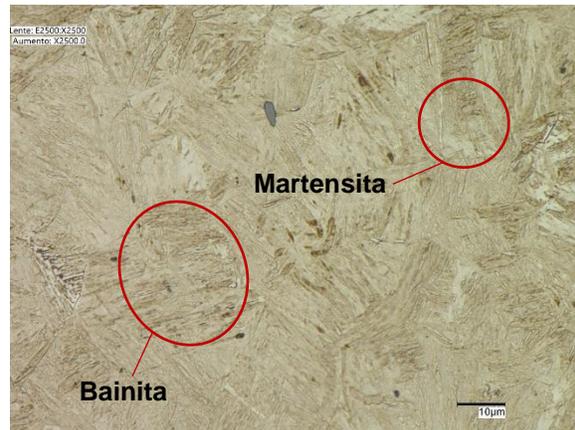


Figura 70. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence, Colonias de martensita y bainita.

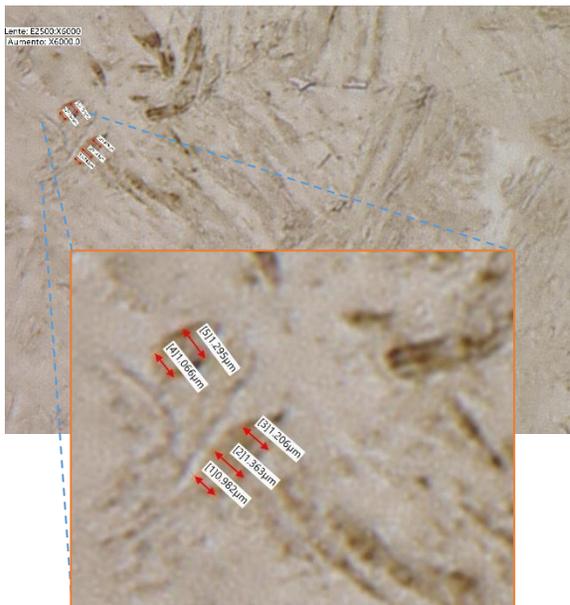


Figura 71. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de bainita.

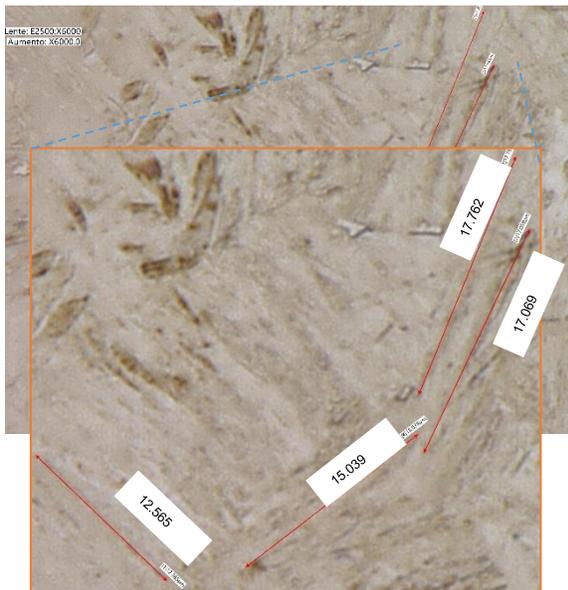


Figura 72. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de martensita.

En el gráfico 6, se muestran los valores de dureza HR_b de los dos aceros, los cuales tienen una diferencia promedio de 14 unidades.

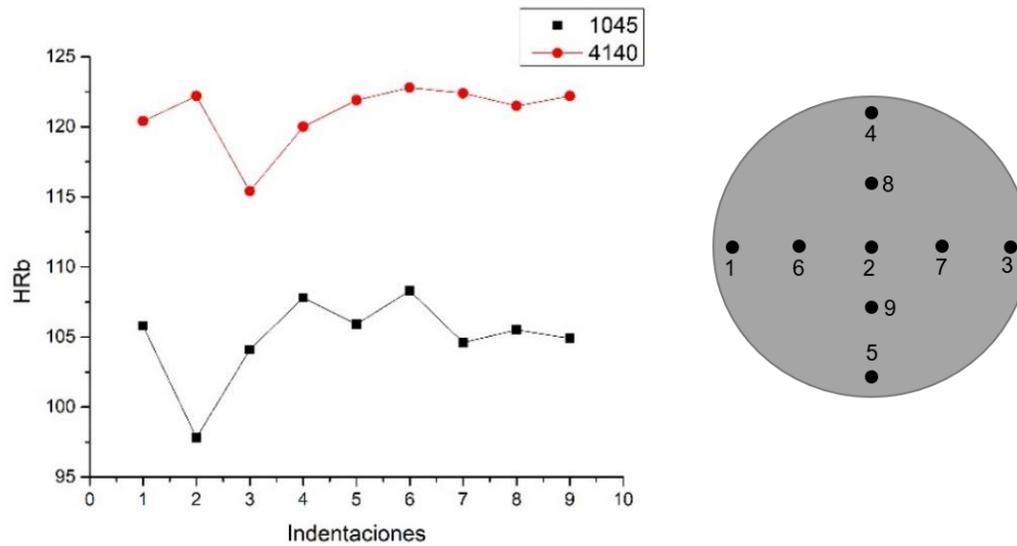
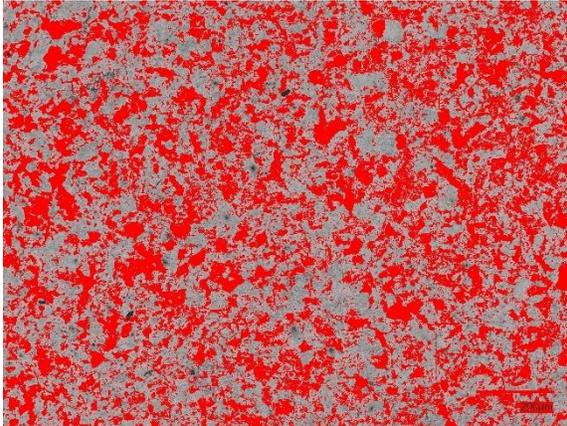


Gráfico 6. Valores de dureza después del temple en aceite.

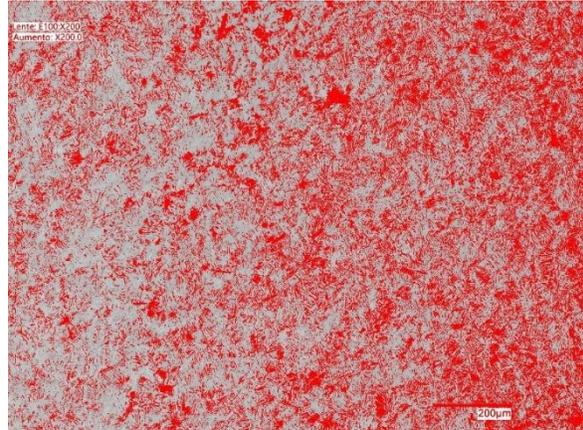
En la figura 73 se proporciona la cuantificación de fases, donde el acero 1045 muestra un 40.62% de ferrita primaria, Widmanstatten y resto perlita, mientras que en el 4140 se observa 55.06% de bainita y resto martensita.

SAE 1045

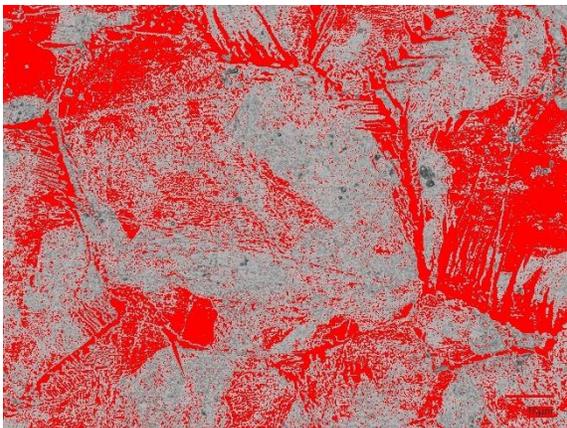


a) La región marcada en color rojo a 200x referente al 44.24%, es a la ferrita, el resto es perlita.

SAE 4140



b) De acuerdo con la región en color rojo a 200x del 34.89 %, se observa la mezcla de bainita y martensita.



c) Se observa una región en rojo a 2500x de 40.62% correspondiente a la ferrita y lo demás es perlita.



d) Región marcada en rojo a 2500x de 55.06%, en donde se observa bainita y resto martensita.

Figura 73. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en aceite.

Analizando la figura 74, la mayor profundidad promedio se encuentra en el acero 1045, con una diferencia de 36.53 μm con relación con el 4140.

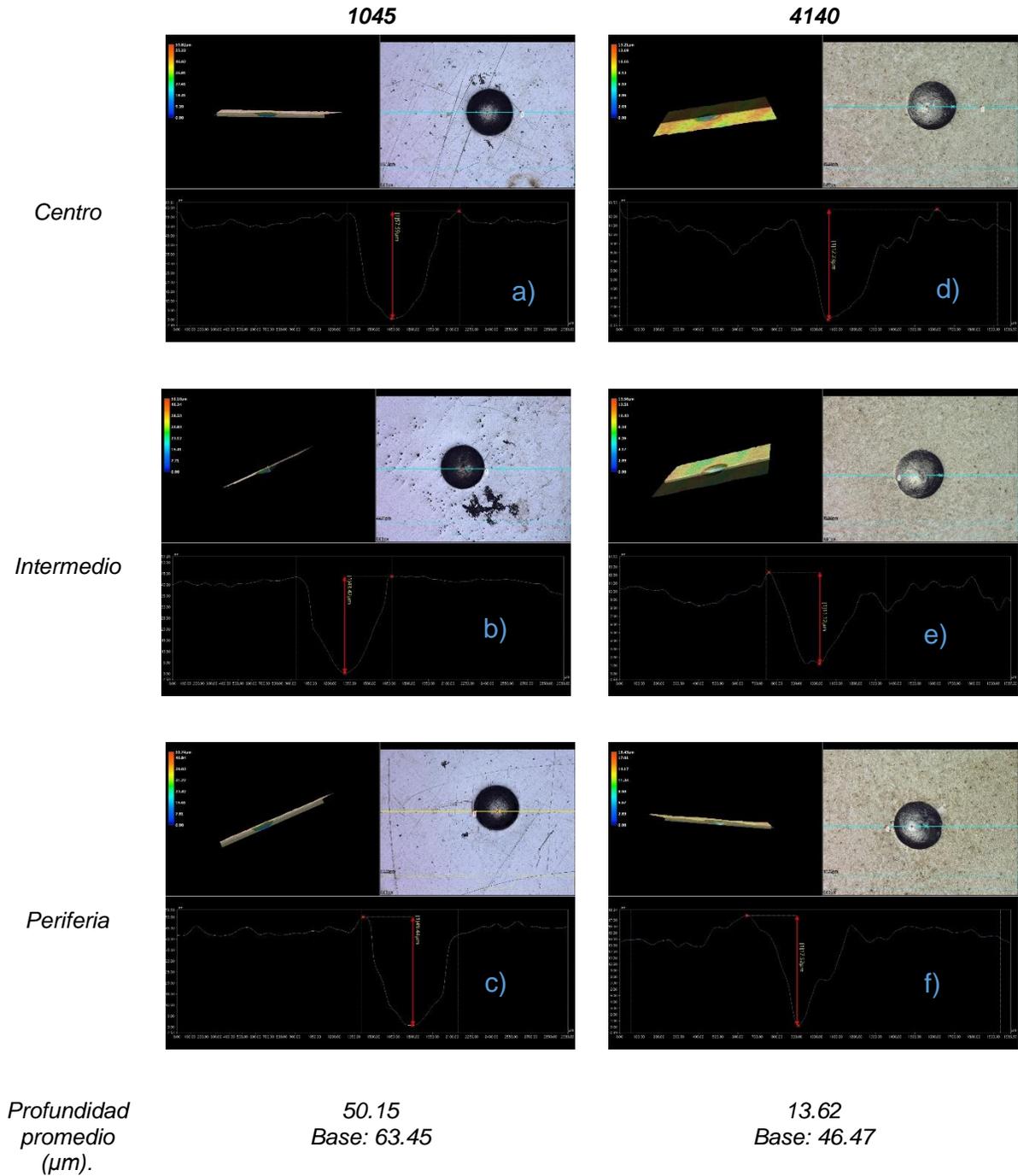


Figura 74. Perfiles de profundidad del enfriamiento en aceite.

III.1.2.6. Enfriamiento en aire ambiente.

➤ SAE 1045

En la figura 75 a 1000X se observa ferrita en color claro, los granos más oscuros corresponden a la perlita; en las figuras 76 a 2500X y 77 a 6000X, se realizó la medición del espacio interlaminar entre la ferrita y cementita en las diferentes colonias de perlita (gruesa, media, fina). Se obtiene un valor de dureza promedio de 96.60 HR_b.

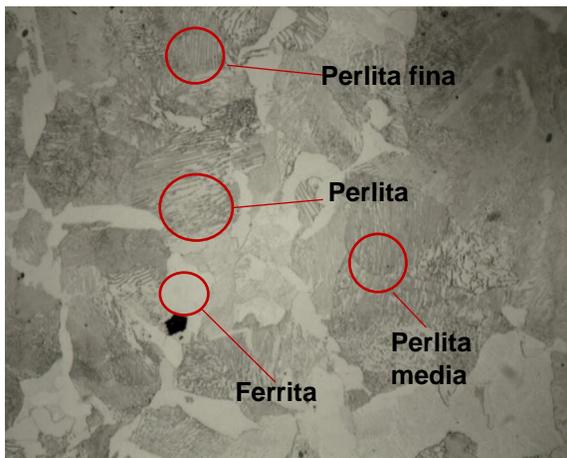


Figura 75. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/2s/Nikon. Medición del espacio interlaminar de ferrita y cementita.

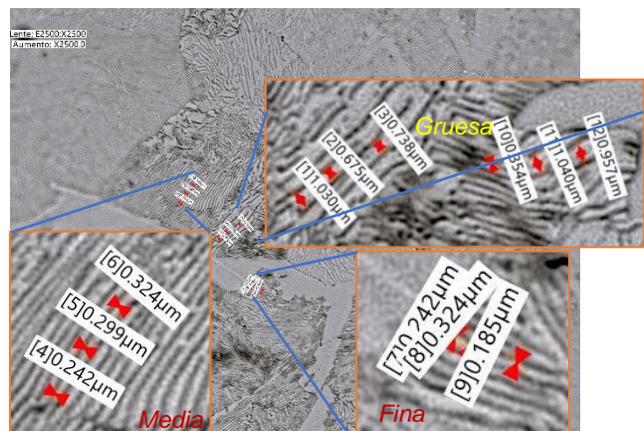


Figura 76. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/2s/ Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.

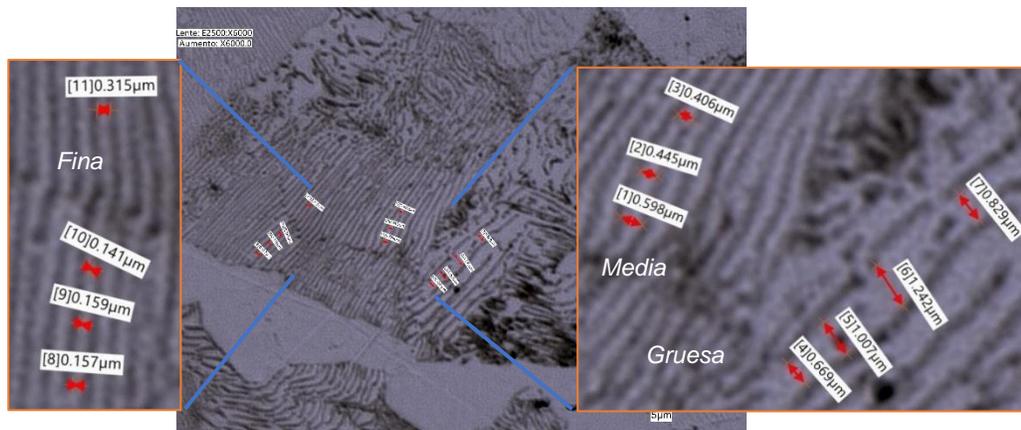


Figura 77. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Medición del espacio interlaminar de ferrita y cementita.

➤ **SAE 4140**

En la figura 78 a 1000X se distinguen regiones claras de ferrita y oscuras de perlita laminar y globular; en la figura 79 a 2500X se observan con mayor definición las fases; en la figura 80 a 6000x, se identifican zonas claras la perlita globular. Después de medir la dureza HR_b se obtiene un valor de 109.66.

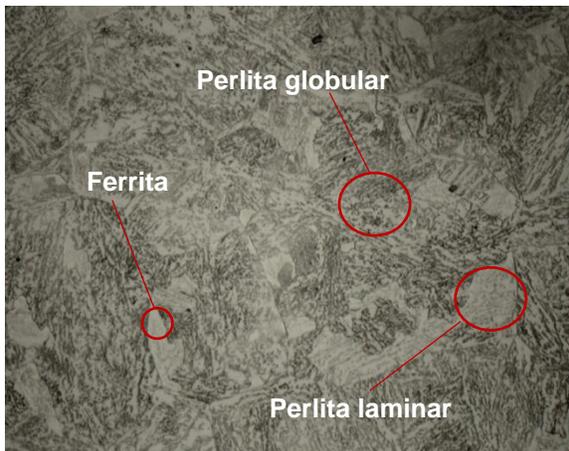


Figura 78. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2s/Nikon. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.

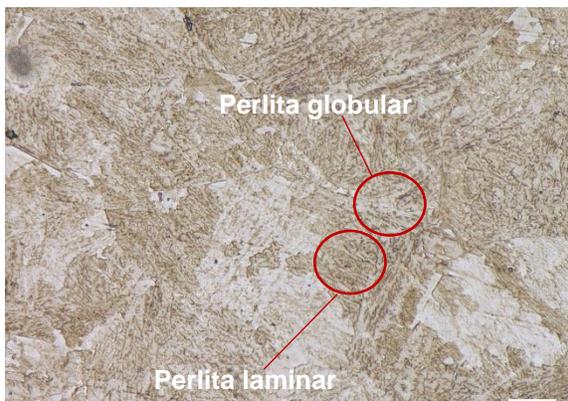


Figura 79. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.

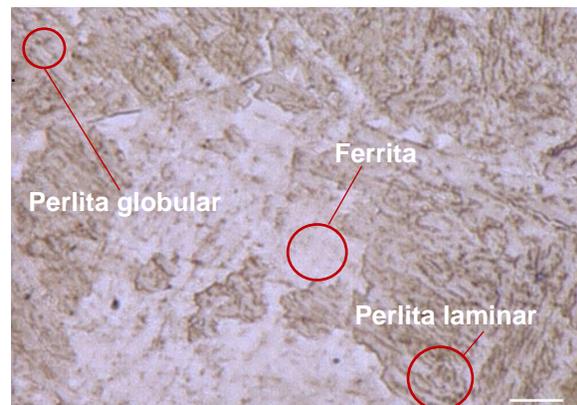


Figura 80. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y globular, zonas claras de ferrita.

En el grafico 8 donde se presentan los valores de dureza, se observa que hay una diferencia de 14 unidades.

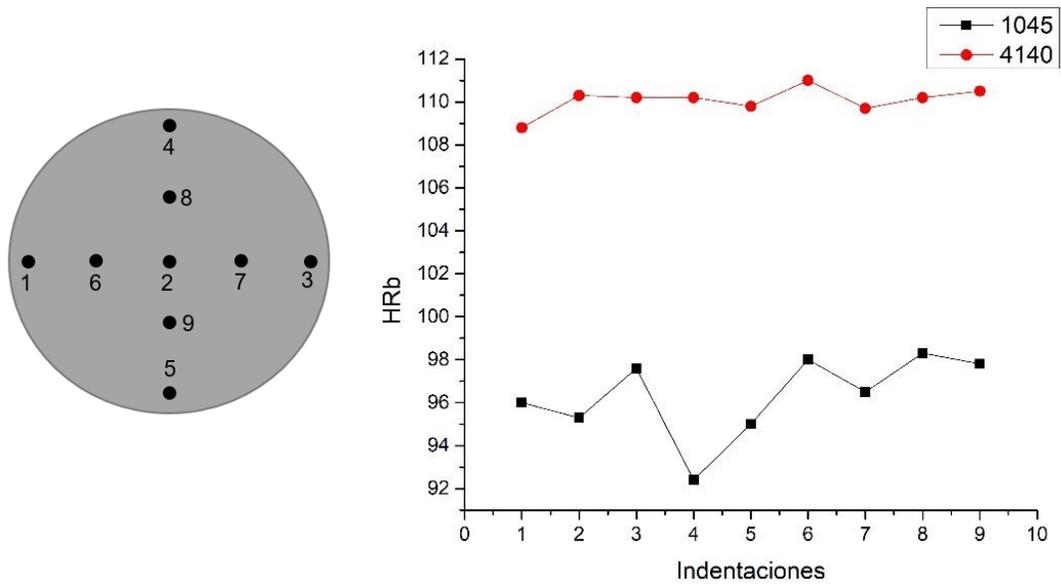
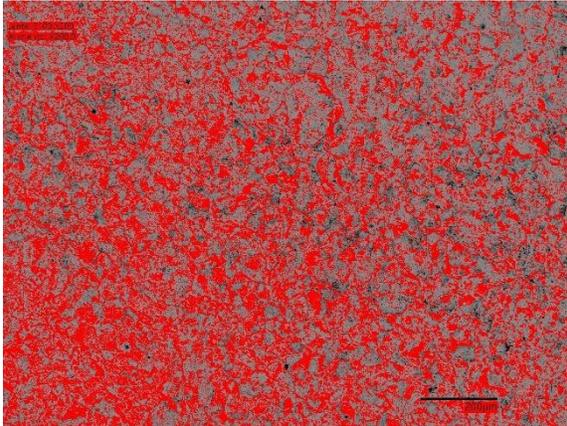


Gráfico 7. Valores de dureza después del normalizado.

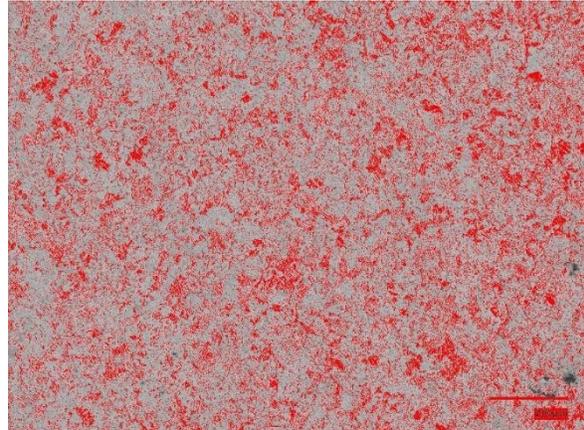
Después de realizar la cuantificación de fases en la figura 81, el acero SAE 1045 presenta un porcentaje de 14.16% mayor de ferrita, respecto al SAE 4140.

SAE 1045

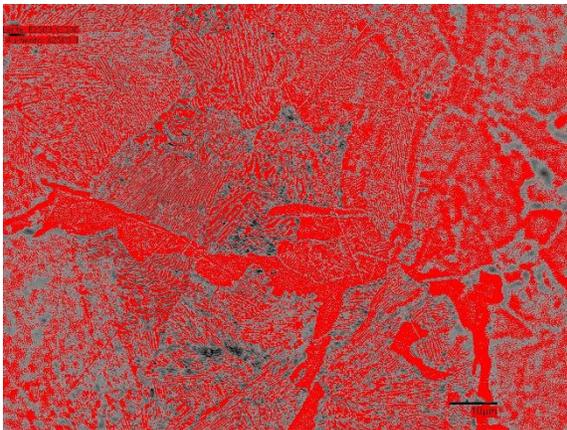


a) La región en rojo a 200x corresponde al 41.90% de ferrita, el resto son granos de perlita.

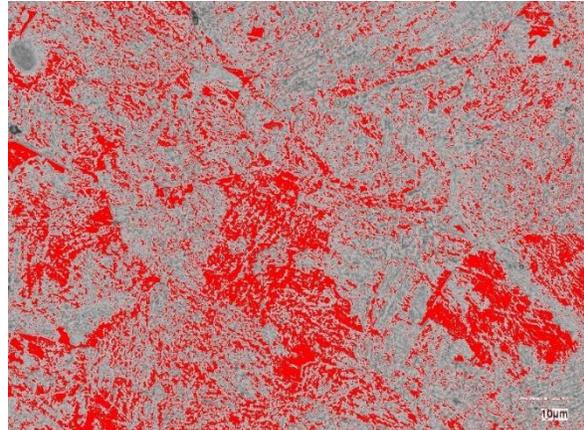
SAE 4140



b) Se identifica una región a 200X de 28.32% de ferrita en color rojo, el resto es perlita.



c) En la región coloreada en rojo, a 2500x corresponde al 48.38% donde se identifica ferrita, lo restante es perlita.



d) De acuerdo con la región marcada en rojo, a 2500x el 34.22% pertenece a la ferrita, además de perlita en color gris.

Figura 81. Metalografías cuantitativas del enfriamiento en aire ambiente.

Se calcula una variación de 25.87 μm en el acero 1045 respecto al acero 4140, además se observan huellas de indentación y superficies uniformes en ambos casos.

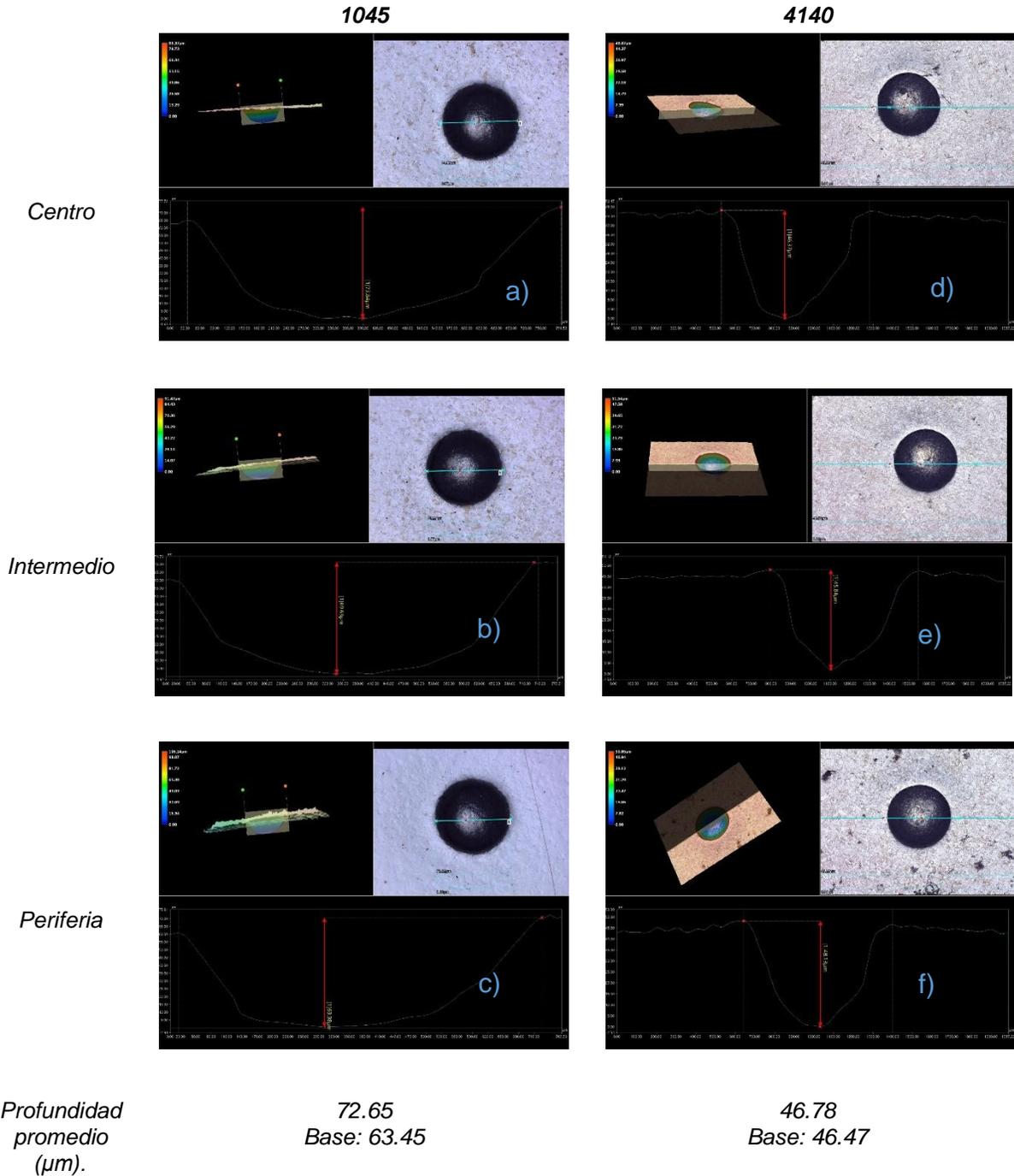


Figura 82. Perfiles de profundidad del enfriamiento en aire ambiente.

III.1.2.7. Enfriamiento en Arena

➤ SAE 1045

En la figura 83 a 1000X se observa la perlita laminar (gruesa, media y fina) en las zonas oscuras, y ferrita en las zonas claras, estas se presentan con mayor resolución en la figura 84 a 2500X; los resultados de la medición del espacio interlaminar en las colonias de perlita se muestran en la figura 85 a 6000X. La dureza que se obtiene es de 95.30 HR_b.

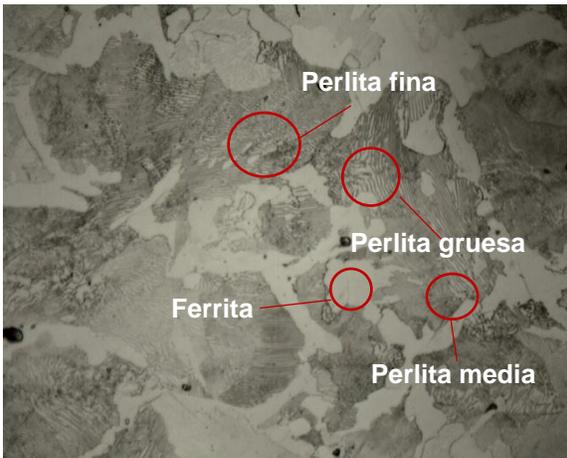


Figura 83. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/3s/Nikon. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.

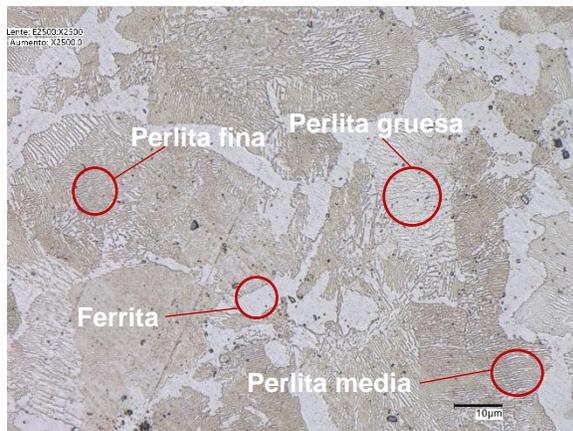


Figura 84. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.

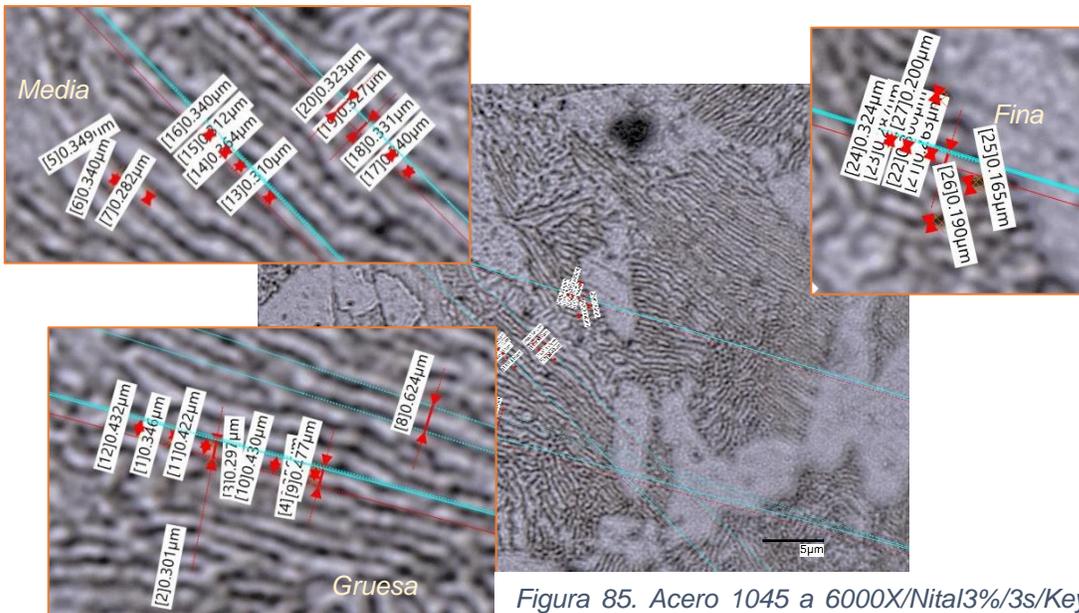


Figura 85. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/3s/Keyence. Medición de los espacios interlaminares de la cementita y ferrita

➤ **SAE 4140**

Se observa ferrita, perlitas globular y laminar en la figura 86 a 1000X, en la figura 87 a 2500x estas fases se distinguen con mejor resolución. La dureza se estima en 107.64 HR_b.

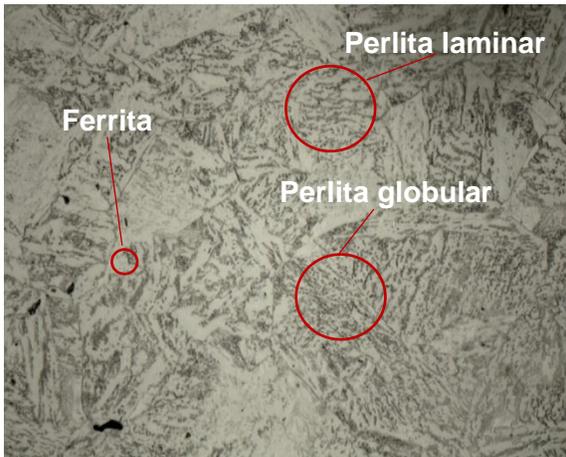


Figura 86. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/3s/Keyence. Perlita globular y ferrita en zonas claras.

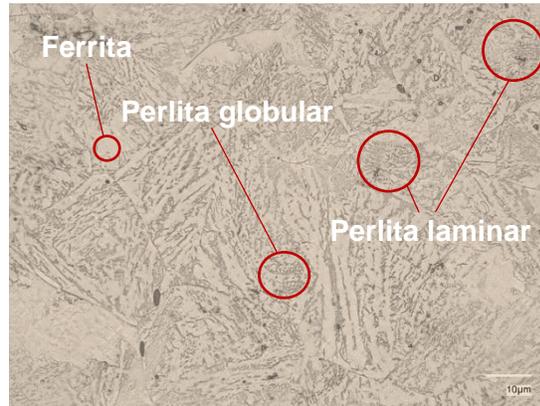


Figura 87. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/3s/Keyence. Perlita globular y ferrita.

El grafico 8 muestra los valores de dureza HR_b, en donde se determinó una diferencia promedio de 10 unidades entre los aceros.

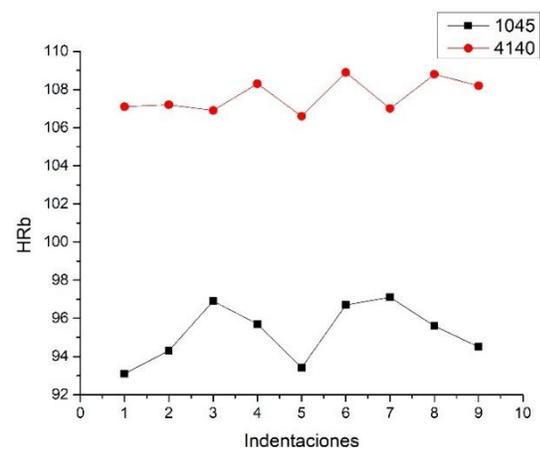
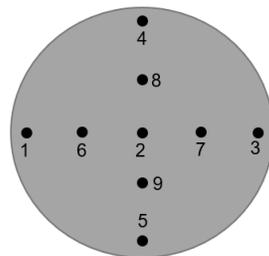
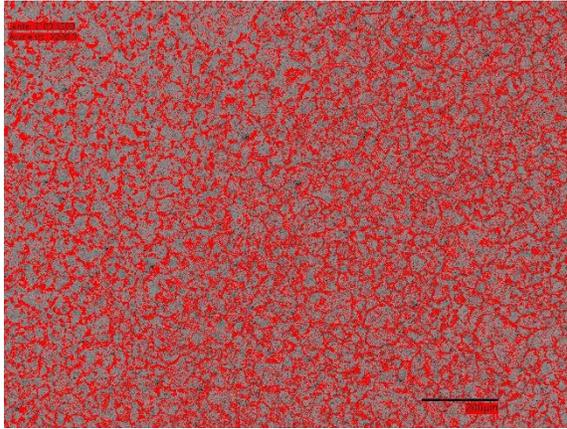


Gráfico 8. Valores de dureza después del enfriamiento en arena.

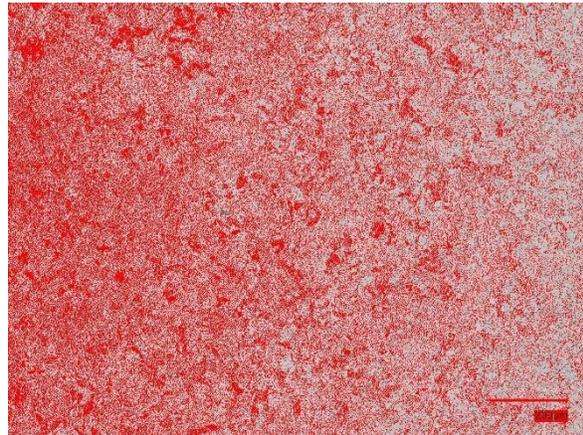
En la figura 88, se presenta la cuantificación de fases, existiendo un porcentaje promedio de 2% más de ferrita en el acero SAE 1045.

SAE 1045

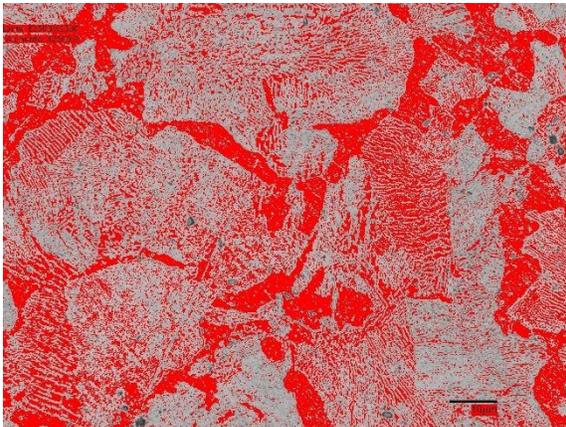


a) Se define una región en rojo a 200x de 36.81% con granos de ferrita, el resto es perlita.

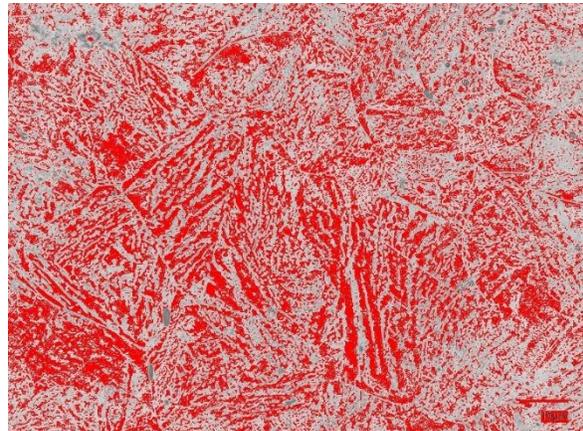
SAE 4140



b) En la región en color rojo a 200x equivalente al 38.94% corresponde a la ferrita, el resto perlita,



c) La región señalada en rojo a 2500x de 41.43 % contiene ferrita, lo restante es perlita en color gris.



d, Se observa una región en color rojo a 2500x de 39.47% de ferrita en rojo, y perlita en color gris.

Figura 88. Metalografías cuantitativas después del temple en arena.

Se calcula una diferencia de la profundidad promedio en el acero 1045 de 36.54 μm , respecto al acero 4140.

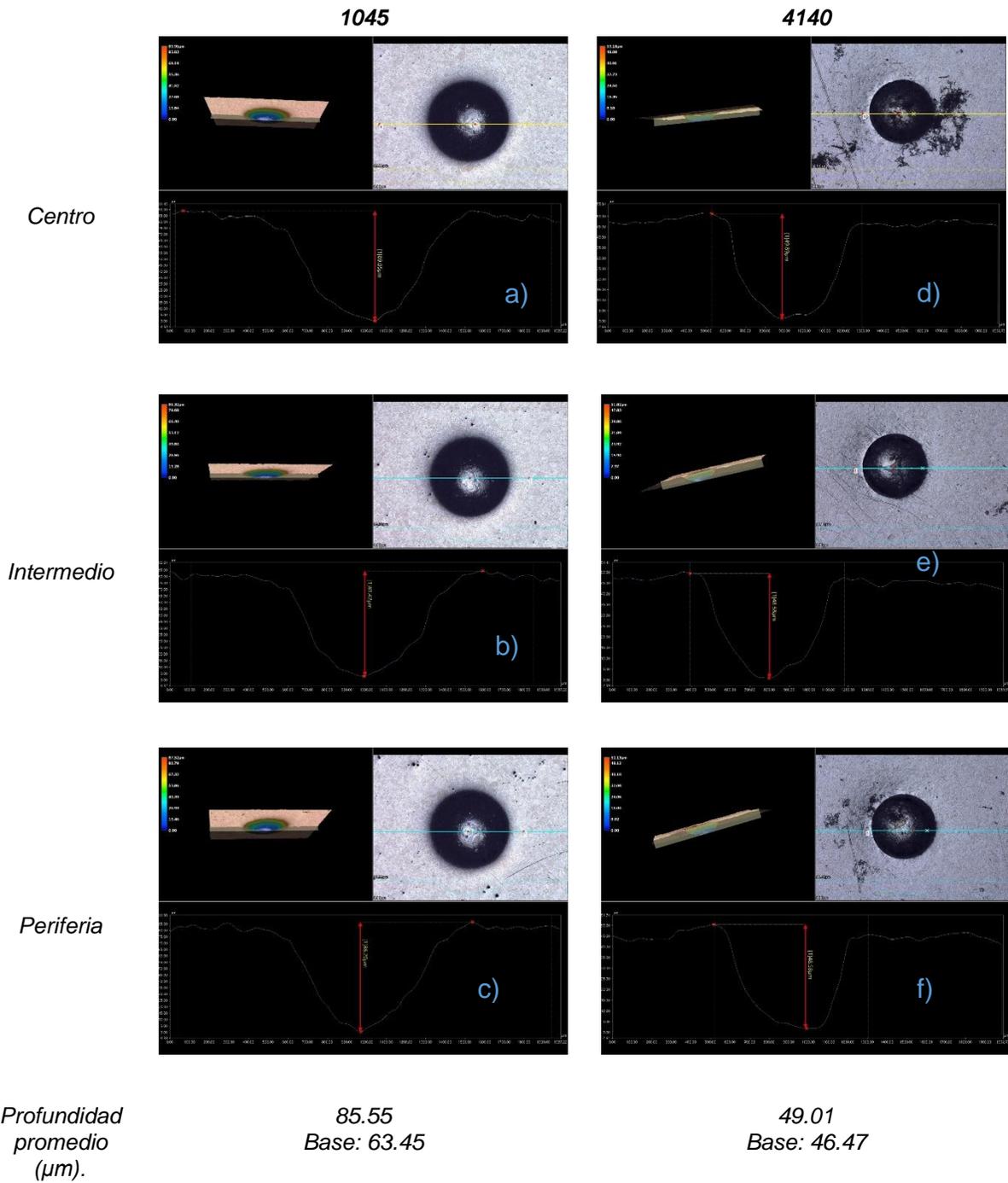


Figura 89. Perfiles de profundidad del temple en arena.

III.1.2.8. Enfriamiento en aire caliente

➤ SAE 1045

En la figura 90 a 1000X se aprecian regiones oscuras de perlita laminar y zonas claras de ferrita, en las figuras 91 a 2500X y 92 a 6000X se observan con mayor definición. El valor promedio de dureza obtenida es de 89.14 HR_b.

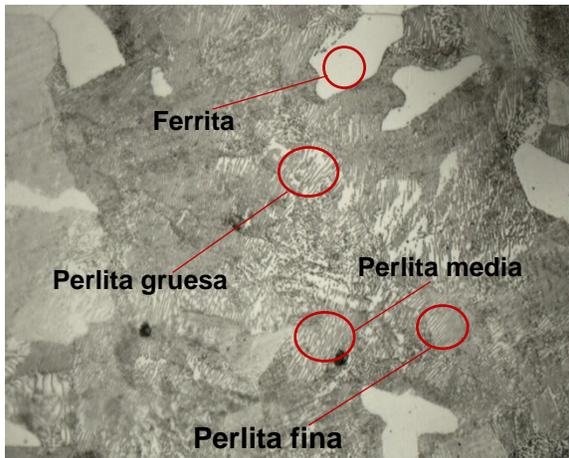


Figura 90. Acero 1045 a 1000X/Nital3%/2.5s/Nikon. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.

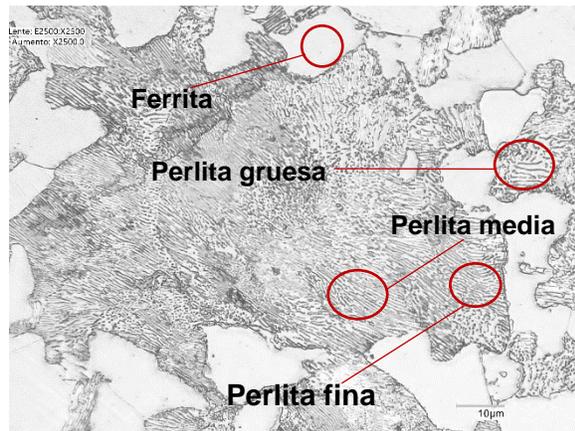


Figura 91. Acero 1045 a 2500X/Nital3%/2.5s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar y claras de ferrita.

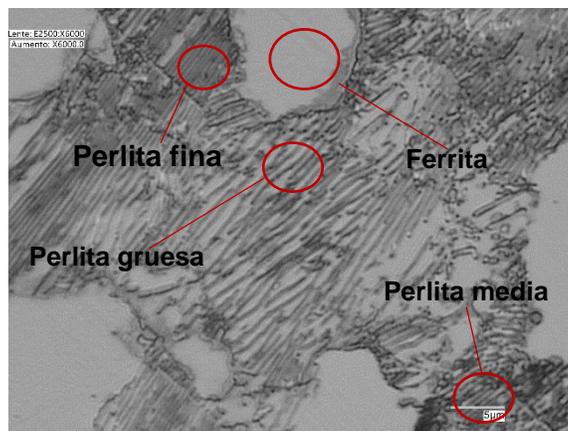


Figura 92. Acero 1045 a 6000X/Nital3%/2.5s/Keyence. Zonas oscuras de perlita laminar (gruesa, media y fina) y claras de ferrita.

➤ **SAE 4140**

En la figura 93 a 1000X se identifican zonas claras de ferrita y en tonos grises la fase perlita laminar, la figura 94 a 2500X muestra las fases con mejor definicion; se midió el espacio interlaminar de la perlita laminar (fina, media y gruesa) el cual se presenta en la figura 95 a 6000X. La dureza obtenida es de 100.67 HR_b.

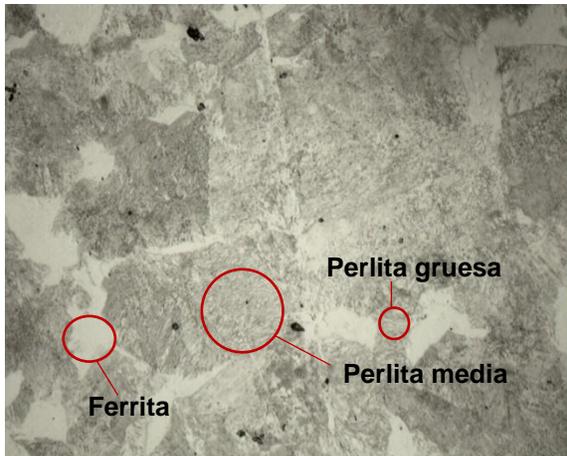


Figura 93. Acero 4140 a 1000X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita.

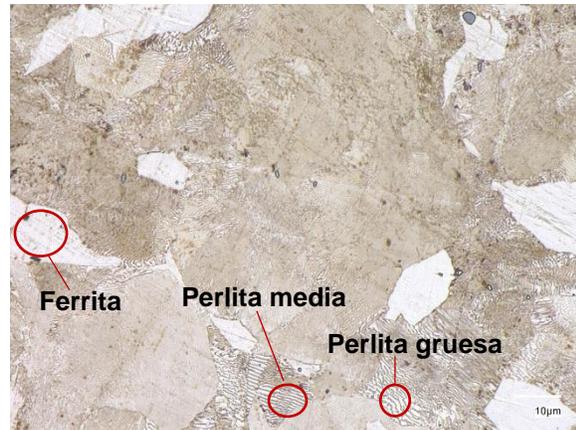


Figura 94. Acero 4140 a 2500X/Nital3%/2s/Keyence. Zonas oscuras de perlita y claras de ferrita

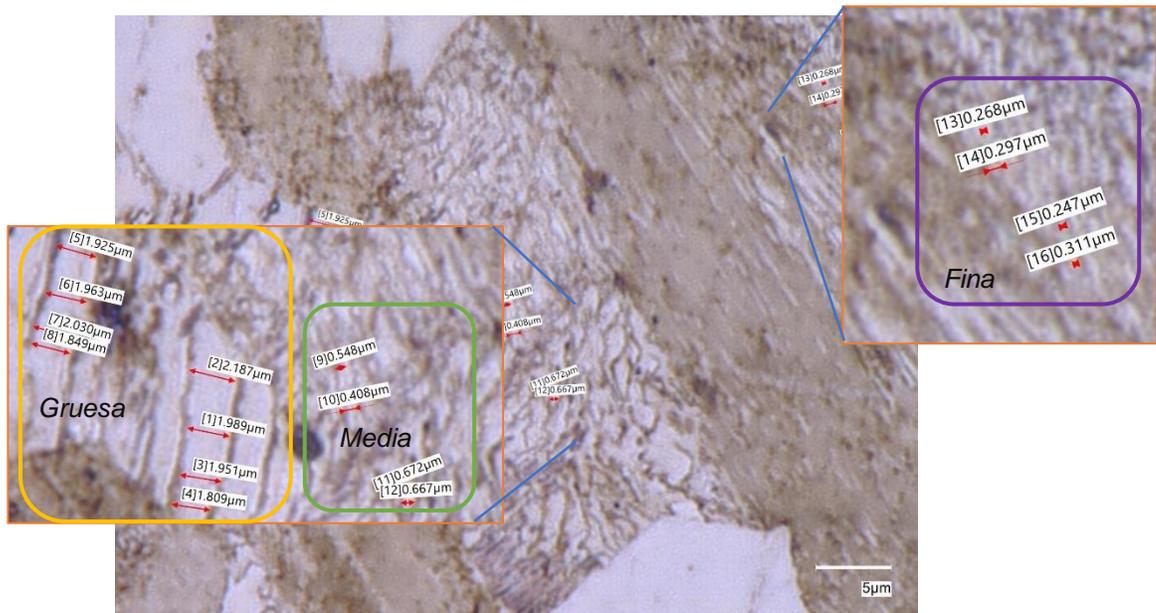


Figura 95. Acero 4140 a 6000X/Nital3%/2s/Keyence. Medición de espacio interlaminar de la ferrita y cementita.

En el gráfico 9, en los valores de dureza de los dos aceros se aprecia una diferencia promedio de 10 unidades.

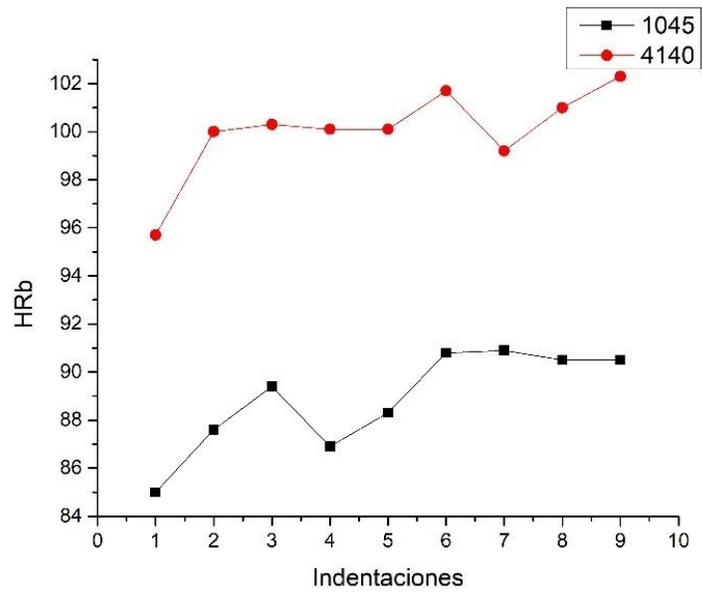
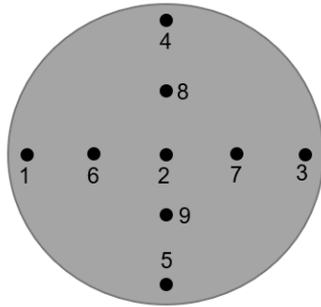
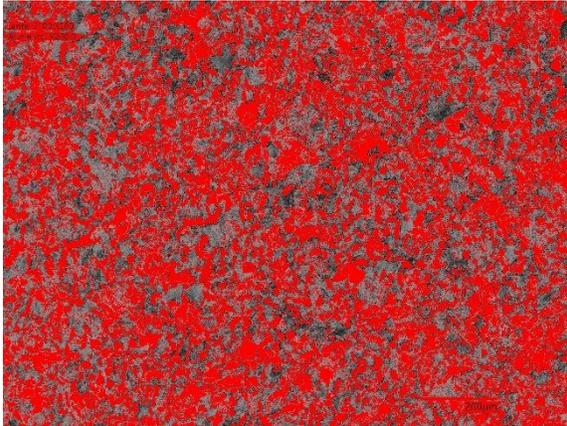


Gráfico 9. Valores de dureza después del recocido.

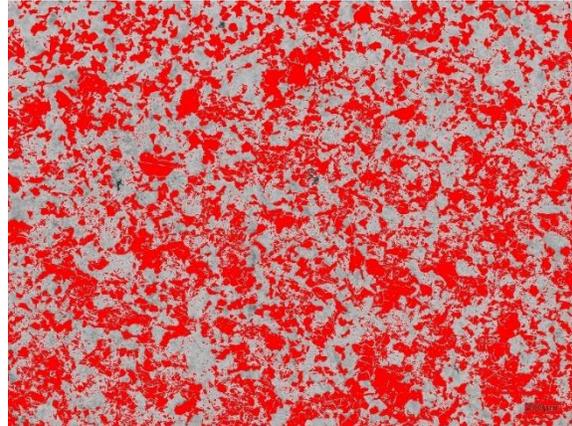
En la figura 96, la cuantificación de fases revela que el SAE 1045 presenta un 12 % más de ferrita que el 4140.

SAE 1045

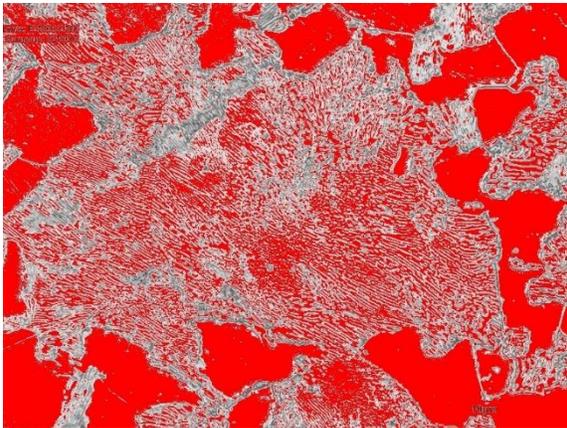


a) Se identifica en color rojo a 200x una región de 49.4 %, en donde se observa ferrita, y perlita en color gris.

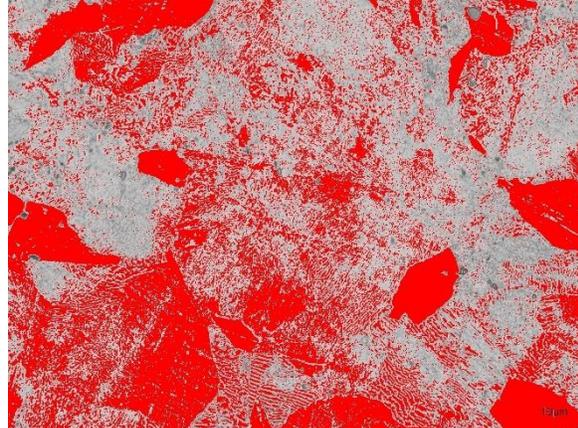
SAE 4140



b) En la región marcada en color rojo a 200x de 49.66% de ferrita, el resto perlita.



c) De acuerdo con la región coloreada en rojo a 2500x de 55.37% perteneciente a la ferrita, lo restante es perlita.



d) Como indica la región en rojo a 2500x de 43.38% correspondiente a la ferrita, y perlita en color gris.

Figura 96. Metalografías cuantitativas después del enfriamiento en aire caliente.

La diferencia de la profundidad promedio de las tres regiones de indentación en el acero 1045 es de 27.12 μm respecto al 4140.

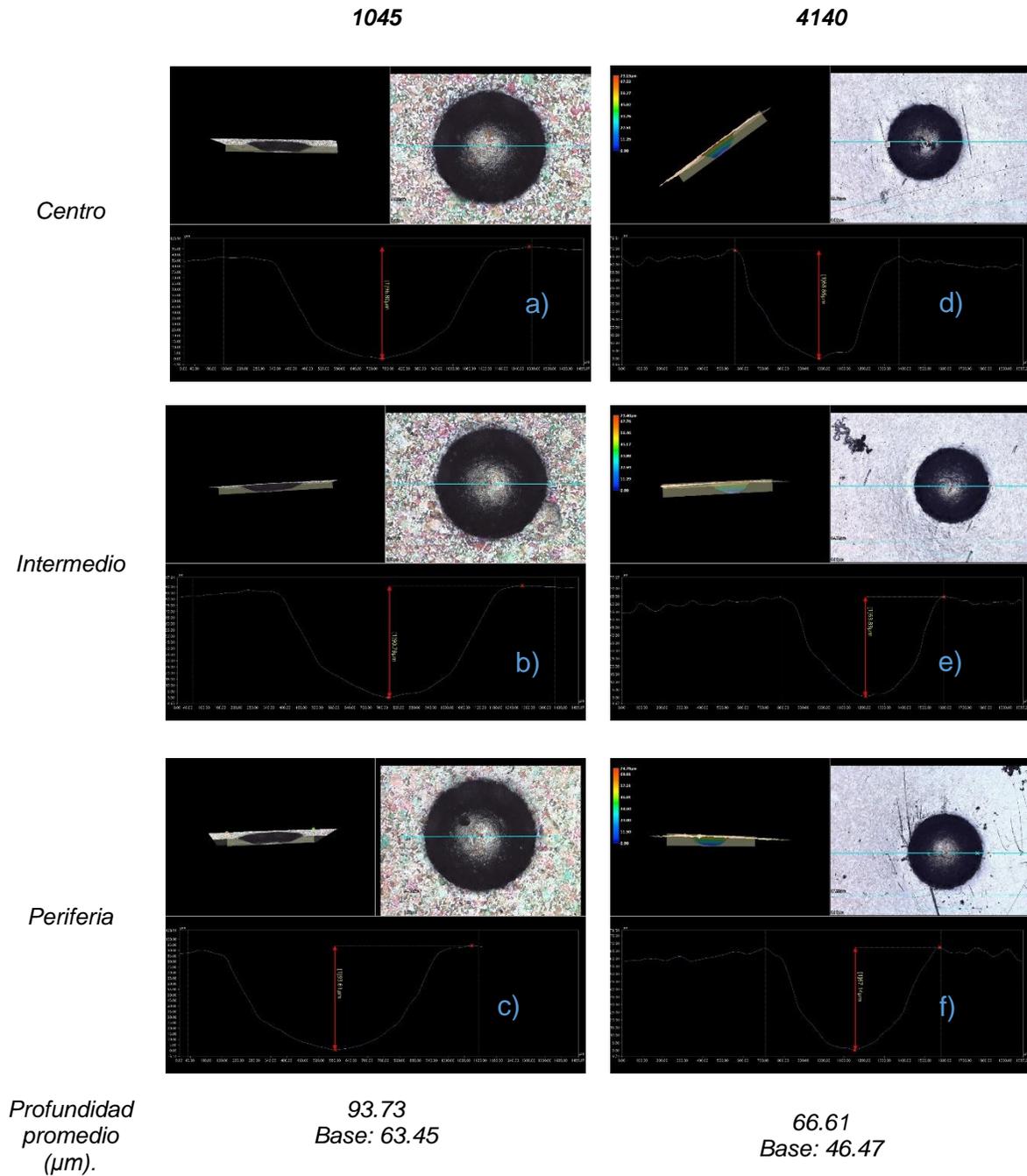


Figura 97. Perfiles de profundidad después del recocido.

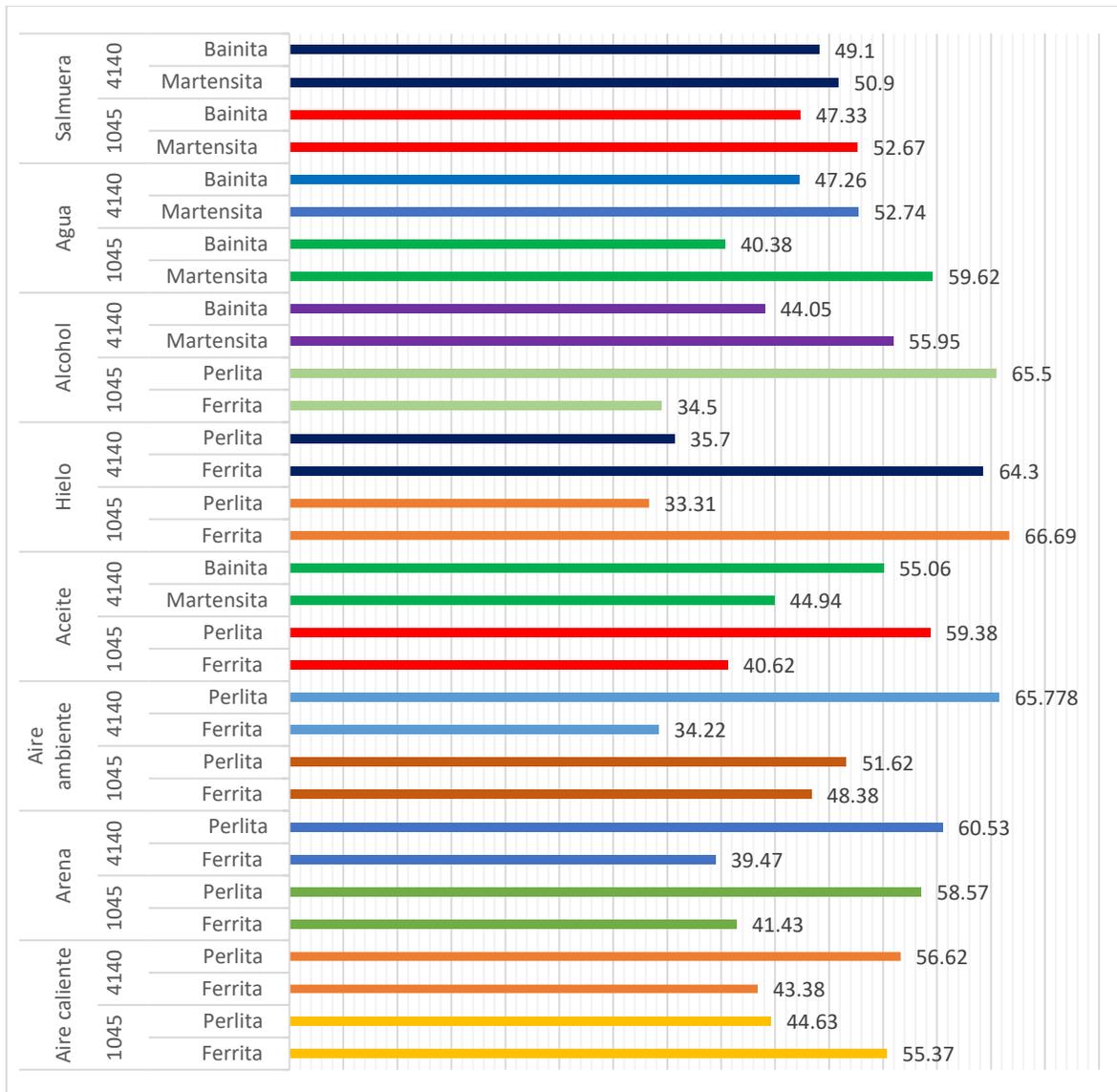


Figura 98. Cuantificación porcentual de fases de los aceros SAE 1045 y 4140 a 2500X obtenidas con el microscopio Keyence VHX 7000

En la figura 98 se demuestra que los porcentajes de fase se obtienen a partir de las curvas de enfriamiento para cada uno de los tratamientos térmicos trazados en las figuras 15 y 16; es decir, en los medios de mayor severidad se forman martensita y bainita, mientras que en los de menor severidad se forman perlita y ferrita.

Tabla 13. Comparativo de los valores de dureza de las probetas.

Temple	Valores HR _b promedio		Diferencia de dureza HR _b respecto a las probetas base	
	1045	4140	1045	4140
Base	100.57	106.93	-	-
Salmuera	108.71	122.67	8.24	15.74
Agua	106.54	123.97	6.06	17.04
Alcohol	108.49	123.34	7.89	16.41
Hielo	108.33	121.91	7.79	14.99
Aceite	105.51	121.51	4.54	14.59
Arena	95.30	107.64	-4.11	0.71
Aire ambiente – normalizado	96.60	109.66	-5.17	2.73
Aire caliente – recocido	89.14	100.67	-11.55	-6.26

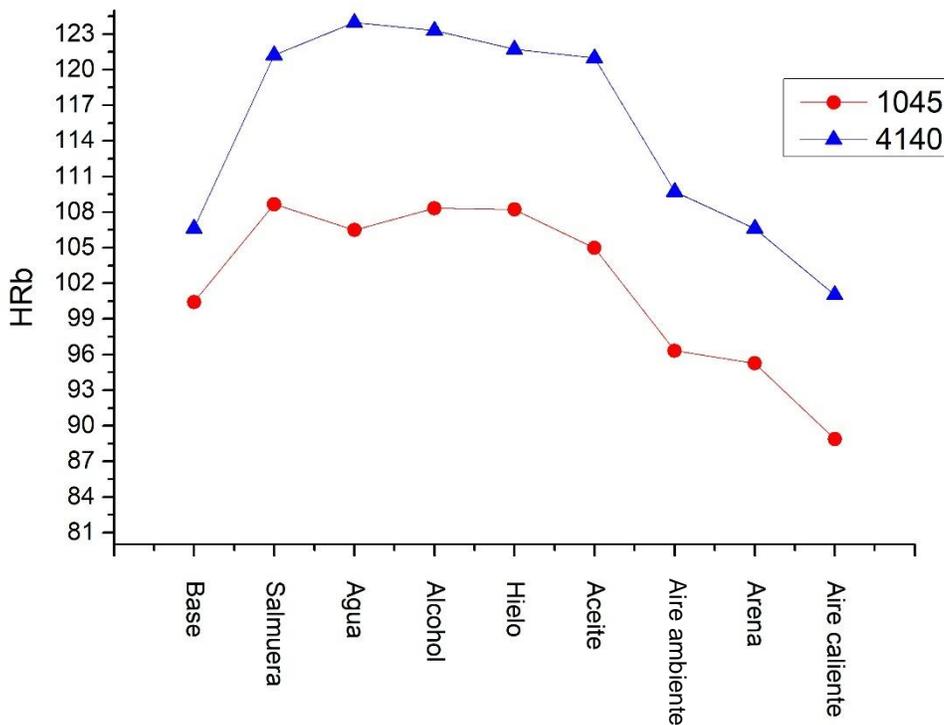


Figura 99. Dureza en los aceros SAE 1045 y 4140 después de ser tratados térmicamente.

Analizando los valores de dureza en las probetas tratadas de los aceros SAE 1045 y 4140, en la tabla 13 y la figura 99, se observa que los valores son mayores en los medios salmuera, agua, alcohol, hielo y aceite, y en los medios agua alcohol, salmuera, hielo y aceite, respectivamente.

Tabla 14. Comparativo de los perfiles de profundidad promedio en los aceros.

Medio de enfriamiento	Profundidad promedio (μm)		Diferencia de la profundidad promedio (μm) respecto a las probetas base.	
	1045	4140	1045	4140
Base	63.45	46.47	-	-
Salmuera	13.21	11.96	-50.24	-34.51
Agua	16.86	14.79	-46.59	-31.68
Alcohol	49.78	14.75	-13.67	-31.72
Hielo	46.89	20.57	-16.56	-25.90
Aceite	50.15	13.62	-13.30	-32.85
Arena	85.55	49.01	22.10	2.54
Aire ambiente-normalizado	72.65	46.78	9.20	0.31
Aire caliente – recocido	93.73	66.61	30.28	20.14

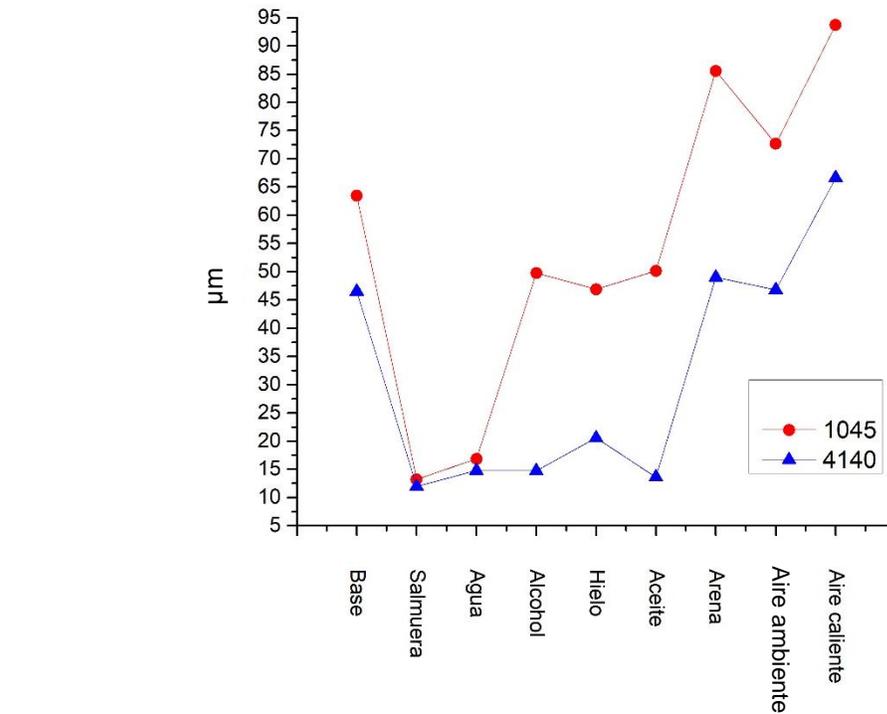


Figura 100. Profundidad de indentaciones en los aceros SAE 1045 y 4140 después de ser tratados térmicamente.

Al evaluar los perfiles de profundidad de las indentaciones en las probetas tratadas, en la tabla 14 y figura 100, los valores de profundidad promedio se relacionan en función de la severidad de temple. Además, se identifica que para los dos aceros en los medios salmuera y agua los valores de profundidad son similares.

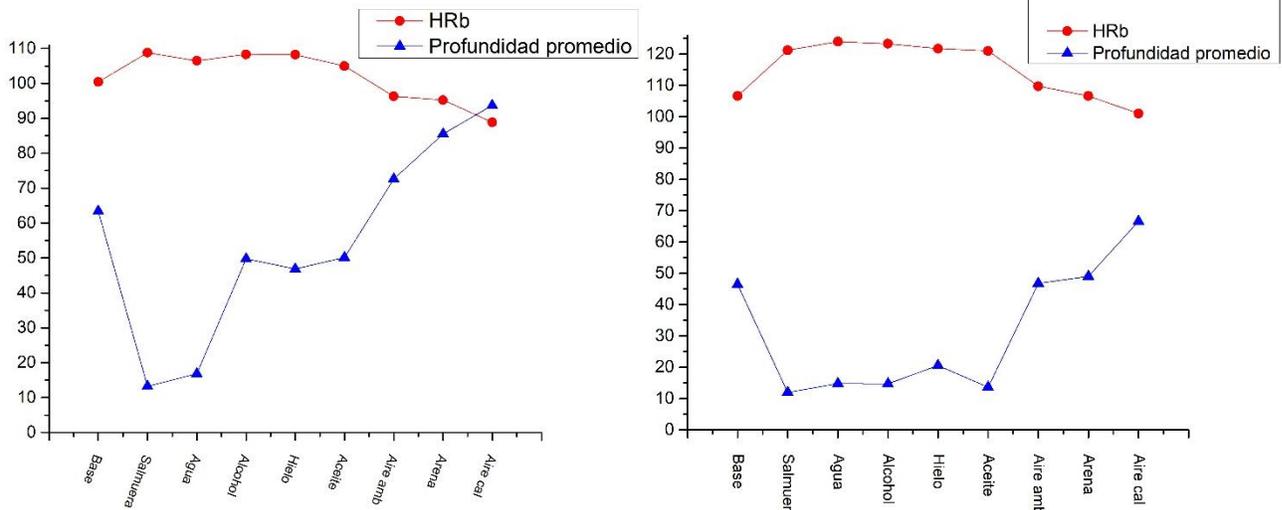


Figura 101. Relación entre la dureza y profundidad promedio de indentación en los aceros SAE a) 1045 y b) 4140 tratados térmicamente.

Se observa en la figura 101 que los valores de dureza Rockwell B y la profundidad promedio tienen una relación inversamente proporcional, se muestra que los medios de mayor severidad tienen una dureza mayor y una profundidad menor. Así mismo en el SAE 4140 esta relación presenta variación, mientras en el SAE 1045, es casi constante.

Conclusiones

Finalmente, al evaluar la caracterización de las probetas, se concluye lo siguiente:

- 1.) La dureza más alta en el acero SAE 1045 se observa en el medio salmuera con un valor de 108.71 HR_b, y el SAE 4140 en el medio agua obtiene un valor de 123.97 HR_b, pero con la formación de grietas.
- 2.) En los medios alcohol, hielo y aceite, en el SAE 1045 se observa la presencia de perlita con porcentajes del 66.5%, 55.8% y 59.38% respectivamente; así mismo en el aceite se identifica la existencia de ferrita Widmanstätten.
- 3.) En el SAE 4140 los medios de mayor severidad de temple promueven la presencia de inclusiones de sulfuro de hierro II, que se relaciona con la formación de grietas.²⁵
- 4.) En los medios aire ambiente y arena, se identifican los tipos de perlita: laminar y globular, esta última es de poca abundancia en forma de pequeñas colonias.
- 5.) Los medios de enfriamiento salmuera y agua en el SAE 1045 forman martensita y bainita, tienen valores de profundidad promedio de 13.21 y 16.86 μm , similares a los del 4140 en los mismos medios.
- 6.) Los medios de enfriamiento salmuera y agua en el SAE 1045 se presentan como una alternativa para el temple de piezas y una posible sustitución al acero aleado, al proporcionar durezas HR_b de 108.71 y 106.54 respectivamente, los cuales se aproximan al valor de dureza HR_b de 106.63 en la probeta base del acero 4140.

Bibliografía

1. Difraxion. (n.d.). *Serviacero especiales*. Serviacero.com. <https://www.serviacero.com/especiales/blog-detalle/54>
2. MAFE. (s.f.). Acero 1045: Características, composición, tratamientos y usos. Aceromafe. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://www.aceromafe.com/acero-1045-caracteristicas-usos/>
3. Aceromafe. (s.f.). Acero 4140: características, propiedades y usos. <https://www.aceromafe.com/acero-4140-caracteristicas/>
4. Belzunce, F. J. (2001). Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones [PDF]. Universidad de Oviedo. https://www.academia.edu/40124229/ACEROS_Y_FUNDICIONES_ESTRUCTURAS_TRANSFORMACIONES_TRATAMIENTOS_TERMICOS_y_APLICACIONES
5. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario. (2011). Principios generales de los tratamientos térmicos de los aceros [PDF]. Repositorio institucional. Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/4-PRINCIPIOS_GENERALES_DE_LOS_TT_v2.pdf
6. Studocu. (s.f.). *Capítulo 3: Martensita* [Apunte de clase, Universidad Nacional de La Plata]. Recuperado el 29 de junio de 2025, de <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-de-la-plata/estructura-y-propiedades-de-las-aleaciones/cap3-martensita/2319658>
7. Askeland, D. R. (2010). *Essentials of materials science and engineering* (2.^a ed.). Cengage Learning.
8. Connor, N. (2021, September 16). *¿Qué es la ferrita? Definición | Propiedades materiales*. Material Properties. <https://material-properties.org/es/que-es-la-ferrita-definicion/>
9. Martin, D. (2024, April 3). *Constituyentes del Acero*. Cia. General De Aceros S.A. <https://www.cga.com.co/blog/constituyentes-del-acero/#:~:text=Cementita%3A%20Es%20carburo%20de%20hierro,y%20fr%C3%A1gil%20de%20los%20aceros.&text=Su%20nombre%20se%20debe%20a,iluminarla%2C%20parecidas%20a%20las%20perlas.>
10. Perez, J. (2016). Capítulo 4: Bainita. *www.academia.edu*. https://www.academia.edu/29477351/Cap%C3%ADtulo_4_Bainita
11. PERLITA. (2016, November 29)LA CIENCIA DE MATERIALES APLICADA a LA FORJA. . . <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/perlita/>
12. Shane. (2023, November 22). 5 morfologías de martensita que debe conocer | MachineMFG. *MachineMfg*. <https://www.machinemfg.com/es/martensite-morphologies/>
13. Hernán, D., Grajales, M., Mecánico, I., & Meneses, A. Z. (2005). CONSIDERACIONES SOBRE APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE TRANSFORMACIONES DE FASE EN ACEROS. *Scientia Et Technica*, 1(27), 115–120. <https://doi.org/10.22517/23447214.6915>

14. Shane. (2024, March 11). Desvelando la transformación del enfriamiento del acero: Widmanstätten vs. Martensite | MachineMFG. *MachineMfg*. https://www.machinemfg.com/es/transformation-of-steel-during-cooling/#google_vignette
15. *Widmanstätten structures*. (n.d.). https://www.tf.unikiel.de/matwis/amat/iss/kap_8/illustr/s8_4_2.html
16. Stevens, N. C., Cuervo, G. M. F., & Habana, C. (1999). Medios de enfriamiento para el temple. *Ingeniería Mecánica*, 2(2), 63–66. <http://www.redalyc.org/pdf/2251/225126120009.pdf>
17. EngineeringToolBox. (2002-2005). *Specific heat capacity of water* [online data]. Recuperado de EngineeringToolBox [jpcfrance.eu+11engineeringtoolbox.com+11nexusstem.co.uk+11](http://www.jpcfrance.eu+11engineeringtoolbox.com+11nexusstem.co.uk+11).
18. EngineeringToolBox. (2017). *Ethanol – specific heat capacity vs. temperature* [online data]. Recuperado de EngineeringToolBox www2.chem.wisc.edu+4engineeringtoolbox.com+4engineeringtoolbox.com+4.
19. EngineeringToolBox. (2004-2005). *Ice – thermal properties* [online data]. Recuperado de EngineeringToolBox engineeringtoolbox.com.
20. EngineeringToolBox. (2001). *Air properties – specific heat capacity* [online data]. Recuperado de EngineeringToolBox engineeringtoolbox.com.
21. My Engineering Tools. (2025). *Specific heat capacity of liquids*. Recuperado de My Engineering Tools myengineeringtools.com.
22. Autor desconocido. (s. f.). *Arena – Densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/681803723/Arena-Densidad-capacidad-calorifica-conductividad-termica>
23. ASTM International. (2017). *ASTM E3-11 (Reapproved 2017): Standard guide for preparation of metallographic specimens* [PDF].
24. ZwickRoell. (s.f.). *Ensayo de dureza Rockwell según ISO 6508*. ZwickRoell. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-rockwell-iso-6508/https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2680/2/ASTM%20E3.pdf>
25. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.

Imágenes

- i1. Cadeco. (s. f.). Perno para cadena 0875805 [Página de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://www.cadeco.com.mx/perno-para-cadena-0875805/p>
- i2. EEVAD. (s. f.). Árbol de salida reductores Origen Santos [Página de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://www.eevad.com/es/arbol-salida-reductores-origen-santos-1-208459.html>
- i3. SQAUDIOCAR (Mercado Libre México). (s. f.). Engrane para segadora agrícola, 15 dientes, interior 25 mm [Página de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-2659231652-engrane-para-segadora-agricola-15-dientes-interior-25mm- JM>
- i4. SXZW Flange. (2022). Cómo instalar la brida de acero inoxidable [Entrada informativa]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://es.sxzwflange.com/info/how-to-install-the-stainless-steel-flange-80151404.html>
- i5. SDAG Flange. (s. f.). Threaded flanges ASME B16.5 150 lb A105 carbon steel pipe fitting [Página de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://es.sdagflange.com/threaded-flanges-asm-b16-5-150lb-a105-carbon-steel-pipe-fitting.html>
- i6. Acer (Mercado Libre México). (s. f.). Motor de barco eje de hélice caja de cambios externa [Publicación de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de <https://www.mercadolibre.com.mx/motor-de-barco-eje-de-helice-caja-de-cambios-externa-acer/p/MLM2003549627>
- i7. Co Hengchuanwin. (s. f.). Machine part steel drive shaft for conveyor roller [Página de producto]. Recuperado el 28 de junio de 2025, de https://es.made-in-china.com/co_hengchuanwin/product_Machine-Part-Steel-Drive-Shaft-For-Conveyor-Roller_eosoneiyy.html
- i8. Oil Drilling. (2019, 12 de abril). 4–12 pinion shaft [Entrada de blog].
Recuperado el 28 de junio de 2025, de <http://oildrilling.es/2019/4-12-pinion-shaft.html>
- i9. Indian Railways Institute of Mechanical & Electrical Engineering. (2019, 26 de diciembre). T-T-T Diagram & Basics of Heat Treatment [Archivo PDF]. RSKR.
Recuperado de <https://rskr.irimee.in/sites/default/files/TTT%20Diagram%20%26%20Heat%20Treatment-converted.pdf>
- i10. Grainger. (s.f.). Sierra cinta horizontal 1 HP, voltaje 120/240, longitud máx. de la cuchilla 93". Grainger México. <https://www.grainger.com.mx/producto/DAYTON-sierra-cinta-horizontal-1-hp-voltaje-120-240-longitud-m%C3%A1x-de-la-cuchilla-93-/p/21UM99>

- i11. Lindberg Labco. (s.f.). Mufla de laboratorio Lindberg 51848.
<https://labco.mx/producto/mufla-de-laboratorio-lindberg-51848/>
- i12. Google Images. (s.f.). Imagen de preparación metalográfica.
<https://images.app.goo.gl/1bwHmp8Q1QjCtm4y8>
- i13. Iowa State University. (s.f.). Buehler Macromet 3100 Macro Hardness Testing. Resource Hub – Iowa State University.
<https://www.resourcehub.iastate.edu/resource/buehler-macromet-3100-macro-hardness-testing/>
- i14. Martin Microscope. (s.f.). Nikon Epiphot 200 BD DIC – Used.
<https://www.martinmicroscope.com/product/nikon-epiphot-200-bd-dic-used/>
- i15. Keyence. (s.f.). VHX-7000 Series Digital Microscope.
https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/lp_vhx-7000/
- i16. Keyence. (s.f.). EA-300 Series – Analizador elemental.
<https://www.keyence.com.mx/products/microscope/elemental-analyzer/ea-300/>
- i17. Voort, G. F. V. (1991). *Atlas of Time-temperature Diagrams for Irons and Steels*.
ASM International.